

Dispositivo automático para operações de acabamento

David José Monteiro Malheiro

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. Manuel Rodrigues Quintas

Prof. Paulo Augusto Ferreira de Abreu



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2014

Resumo

Atualmente, com a indústria a recorrer a linhas de produção totalmente automatizadas e com ritmos de produção elevados, a necessidade de mão-de-obra qualificada para a realização de operações de acabamento é tida como uma das maiores causas de quebra de produção, sendo, portanto, associada a maiores custos de produto final.

Com vista a solucionar este problema, foram introduzidos os robôs industriais de seis eixos para executar as operações de acabamento final. Esta abordagem ao problema necessita de disponibilização de meios para controlar a força de contacto entre as peças a trabalhar e a ferramenta.

Estes são os fatores que motivam este trabalho, no qual foi desenvolvido um dispositivo automático com controlo de força, para auxiliar operações de acabamento, projetado para operar em paralelo com um robô industrial. Este projeto propõe uma evolução do dispositivo desenvolvido anteriormente, por Diogo Gigante Viana, integrando outras formas de controlo e eletrónica de comando.

Inicialmente é feita uma introdução ao tema do trabalho, visando uma correta definição dos objetivos do projeto. Esses objetivos passam pelo projeto mecânico e pneumático do dispositivo, bem como pela implementação de sistemas de controlo e monitorização do sistema.

Após esta introdução é feito um estudo do princípio de funcionamento do dispositivo de acabamento, seguido do desenvolvimento do seu projeto mecânico e pneumático, com vista a cumprir os objetivos.

O terceiro capítulo foca-se no estudo do sistema eletrónico de comando do dispositivo. Assim, é realizado um estudo sobre a arquitetura de comando que melhor responde aos requisitos do sistema. Para complementar a compreensão da arquitetura, são ainda descritos todos os componentes do sistema, bem como os protocolos e tipos de comunicação utilizados.

Com a arquitetura do sistema eletrónico de comando definida, são implementados os sistemas de controlo e monitorização. Este controlo é efetuado através de um microcontrolador, programado de modo a corresponder aos objetivos do trabalho.

Automatic device for finishing operations

Currently, the industry is resorting to fully automated production lines and high production rates. The need for skilled labour to perform finishing operations is considered one of the major causes of loss production, and therefore associated to higher final product costs.

In order to solve this problem, six-axis industrial robots are used to perform the finishing operations. This approach to the problem requires the provision of means to control the contact force between the workpiece and the tool.

These are the factors that motivate this project, in which it was developed an automatic control device with force control, to assist finishing operations, designed to operate in parallel with an industrial robot. This project proposes to upgrade the device previously developed by Diogo Gigante Viana, integrating other electronic monitoring and control forms.

Initially, the project starts with an introduction to the topic project, aiming at a correct definition of the project goals. These goals involve the mechanical and pneumatic design of the device as well as implementing a control and monitoring system.

After this introduction, the principle of operation of the finishing device is presented, followed by the development of the mechanical and pneumatic project.

The third chapter focuses on the device electronic control system. Thus, it is performed a study of the architecture of command that best responds to the system requirements. For further understanding of the project architecture it is described the system components and the protocols and types of used communications.

With the architecture of the command electronic system defined, control and monitoring systems are implemented. This control uses a microcontroller programmed to achieve the project goals.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, o Professor Manuel Quintas e o Professor Paulo Abreu, por toda a disponibilidade e acompanhamento ao longo de todo este projeto, deixo aqui o meu sincero Obrigado.

Agradeço também ao coordenador da opção de Automação, o Professor Francisco Freitas, por todo o interesse e acompanhamento que demonstrou durante o projeto.

Gostaria ainda de agradecer à Natacha e Melissa, por estarem sempre presentes ao longo do projeto, particularmente na altura de escrever e corrigir. Obrigado por todas as horas que dedicaram a melhorar o meu trabalho.

Queria ainda agradecer a todos os meus amigos, em especial ao Pedro, ao Vasco, ao Diogo e Roberto, por todo o companheirismo e amizade que demonstram. Ainda que percebam pouco do que eu estudo, estão sempre dispostos a ouvir e a incentivar-me a fazer melhor.

Por fim gostaria de agradecer à minha família, em especial ao meu pai e à minha mãe, por todo o apoio e incentivo, não só para este projeto mas também durante toda a minha vida. Ao meu pai por me mostrar que podemos sempre ser melhores. À minha mãe por ser a minha inspiração.

Índice de Conteúdos

1	Introdução e objetivos	1
1.1	Introdução	1
1.1.1	Robôs industriais	2
1.1.2	Dispositivos de controlo de força	4
1.1.3	Dispositivo DROA	7
1.2	Objetivos do trabalho	9
1.3	Organização da dissertação	10
2	Desenvolvimento do dispositivo	11
2.1	Introdução	11
2.2	Princípio de funcionamento do dispositivo de acabamento	11
2.3	Projeto mecânico	14
2.3.1	Base fixa	15
2.3.2	Mesa móvel	17
2.3.3	Compartimento de comando	19
2.4	Projeto do Sistema Pneumático	24
2.4.1	Equipamento pneumático	26
2.5	Conclusão	28
3	Desenvolvimento do sistema eletrónico de comando	31
3.1	Introdução	31
3.2	Arquitetura de controlo	31
3.3	<i>Hardware</i> eletrónico	32
3.4	Implementação do sistema eletrónico de comando	35
3.5	Protocolos de comunicação	36
3.6	Conclusão	37
4	Desenvolvimento do <i>Software</i> de controlo	39
4.1	Introdução	39
4.2	Programação	39
4.3	Conclusão	43
5	Conclusões e trabalhos futuros	45
5.1	Conclusões	45
5.2	Sugestão de trabalhos futuros	46
6	Referencias	47

Dispositivo automático para operações de acabamento

Anexos	49
Anexo A – Desenhos de definição das peças constituintes do dispositivo	51
Anexo B – Código de programação do microcontrolador PIC 18LF4431.....	75

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Robô em operação de acabamento (polimento) [2]	2
Figura 1.2 - Máquina CNC [4]	3
Figura 1.3 - Linha de produção automática [5]	4
Figura 1.4 - Sensor de força ATI DELTA IP60	5
Figura 1.5 - PushCorp AFD80.....	6
Figura 1.6 - PushCorp AFD 1200.....	7
Figura 1.7 - Dispositivo DROA.....	7
Figura 1.8 - Princípio de funcionamento do dispositivo DROA	8
Figura 2.1 - Fresagem cilíndrica discordante (A) e concordante (B) [9]	12
Figura 2.2 - Princípio de funcionamento do novo dispositivo	13
Figura 2.3 - Leitura do deslocamento pelo <i>encoder</i>	13
Figura 2.4 - Base fixa (A), mesa móvel (B) e compartimento de comando (C)	14
Figura 2.5 - Mesa linear existente (A) e representada (B).....	14
Figura 2.6 - Base e suportes da mesa linear	15
Figura 2.7 - Vista explodida da base fixa	16
Figura 2.8 - Junta SMC JA real (A) [10] e representada (B)	17
Figura 2.9 - Cantoneira entra tampa superior e frente	18
Figura 2.10 - Vista explodida da mesa movel	18
Figura 2.11 - Chão e paredes estruturais do compartimento de comando.....	19
Figura 2.12 - Compartimento isolado para a fonte de alimentação.....	20
Figura 2.13 - Colocação da <i>rack</i> para as cartas de comando.....	20
Figura 2.14 - Atravancamento das válvulas e transdutores pneumáticos.....	21
Figura 2.15 - Janelas nas laterais do compartimento de comando	21
Figura 2.16 - Vista explodida do compartimento de comando	22
Figura 2.17 - Vistas pormenorizadas do dispositivo com os três módulos posicionados (vista isométrica, vista de topo esquerdo, vista topo direito, vista de cima e vista da lateral direita, respetivamente).....	23
Figura 2.18 - Montagem do circuito pneumático com duas válvulas reguladoras de pressão .	24
Figura 2.19 - Montagem do circuito pneumático com uma servo-válvula 5/3.....	25
Figura 2.20 - Cilindro SMC MQMLB25TN-100D [11]	26
Figura 2.21 - Válvula reguladora de pressão SMC ITV2050-21N2BL3-Q [12].....	27

Figura 2.22 - Transdutor de pressão ISE40A-N01-R-D-X50 [13]	27
Figura 2.23 - Servo-válvula 5/3 Festo MPYE-5-1/4-010-B [14].....	28
Figura 2.24 - Representação do aspeto final do dispositivo	29
Figura 3.1 - Arquitetura de controlo do dispositivo.....	32
Figura 3.2 - Microprocessador PIC18LF4431, descrição dos pinos (A) e fotografia (B) [15] 33	
Figura 3.3 - Diagrama de blocos de um integrado MCP 4422	33
Figura 3.4 – Descrição de pinos (A) e diagrama de blocos (B) de um integrado MAX232....	34
Figura 3.5 - LCD 2x16 (A) [16] e teclado (B) [17]	34
Figura 3.6 - Descrição de pinos do integrado MAX667	35
Figura 3.7 - Implementação em <i>breadboard</i> do sistema de controlo	35
Figura 3.8 - Comunicação SPI [18]	36
Figura 3.9 - Comunicação série [19].....	37
Figura 4.1 - PICkit 3 [20].....	39
Figura 4.2 - Esquema de funcionamento da função de configuração	40
Figura 4.3 - Esquema de funcionamento da função de comunicação SPI	41
Figura 4.4 - Mensagem inicial (A) e configuração de trabalho (B) do LCD	42
Figura 4.5 - Variação da tensão à saída dos conversores D/A, com a variação do <i>encoder</i>	42
Figura 4.6 - Representação esquemática do ciclo fechado	43

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Força nominais em função das pressões nas valvulas reguladoras de pressão	25
--	----

Dispositivo automático para operações de acabamento

1 Introdução e objetivos

1.1 Introdução

A indústria procura constantemente formas de melhor produzir, em maiores quantidades e com custos menores. Nesta procura de evolução é então natural que apareça a automação associada aos processos industriais.

Automatizar significa, para qualquer indústria, maior volume de produção, maior qualidade final e menor custo associado ao produto. No entanto, para além destes fatores económicos, a automatização dos processos também permite melhorias na área da segurança, proporcionando melhores condições de trabalho, bem com na área ambiental, com a redução dos desperdícios.

Atualmente já é possível para diversos processos industriais a implementação de linhas de produção totalmente automatizadas, nas quais é possível introduzir a matéria-prima e recolher o produto final totalmente acabado. Contudo, devido a exigências específicas de alguns produtos, nem sempre é possível implementar linhas de produção totalmente automáticas. Estas exigências, tais como tolerâncias dimensionais apertadas ou rugosidades rigorosas, não permitem automatizar a operação de acabamento da peça. Esta impossibilidade leva a que seja necessário recorrer a mão-de-obra especializada, o que torna o processo mais lento e dispendioso. É neste sentido que surge a necessidade de melhorar o processo de automatização das operações de acabamento.

Robôs industriais com 6 graus de liberdade são, por isso, utilizados em células de acabamento. Contudo, esta solução nem sempre é eficaz requerendo por vezes um tempo de programação dos robôs muito elevado, o que acarreta custos altos. Atualmente tem-se observado um desenvolvimento de máquinas de controlo de força para operar em paralelo com o robô, o que permite a utilização de robôs com menor tempo de programação e adaptação a diferentes geometrias e condições de trabalho.

As operações de acabamento superficial aparecem sempre no final da linha de produção, o que as torna ainda mais exigentes, devido a já se tratar, muitas das vezes, de peças com valor comercial. Estas exigências são também mais elevadas em relação ao rigor e complexidade, comparativamente a outras fases do processo de produção. Foram estes fatores que ditaram o atraso na automatização destes processos, mesmo sendo reconhecido o aumento do custo de produção e o “*bottleneck*” na linha de produção. Atualmente, estas operações finais são responsáveis por cerca de 10 a 30% do custo final da peça [1]. Estes custos devem-se à operação de acabamento propriamente dita, bem como às fases de inspeção, possível necessidade de voltar a maquinar ou por vezes rejeição total da peça.

As principais operações de acabamento efetuadas por robôs são operações de abrasão, sendo elas a rebarbagem, lixagem e polimento (figura 1.1). Estas operações diferem entre si na taxa de remoção de material, qualidade de acabamento e, conseqüentemente, nas forças de

contacto envolvidas. No entanto, são operações poeirentas, que por vezes podem libertar gases tóxicos, o que aumenta o risco de doenças profissionais aos operadores.

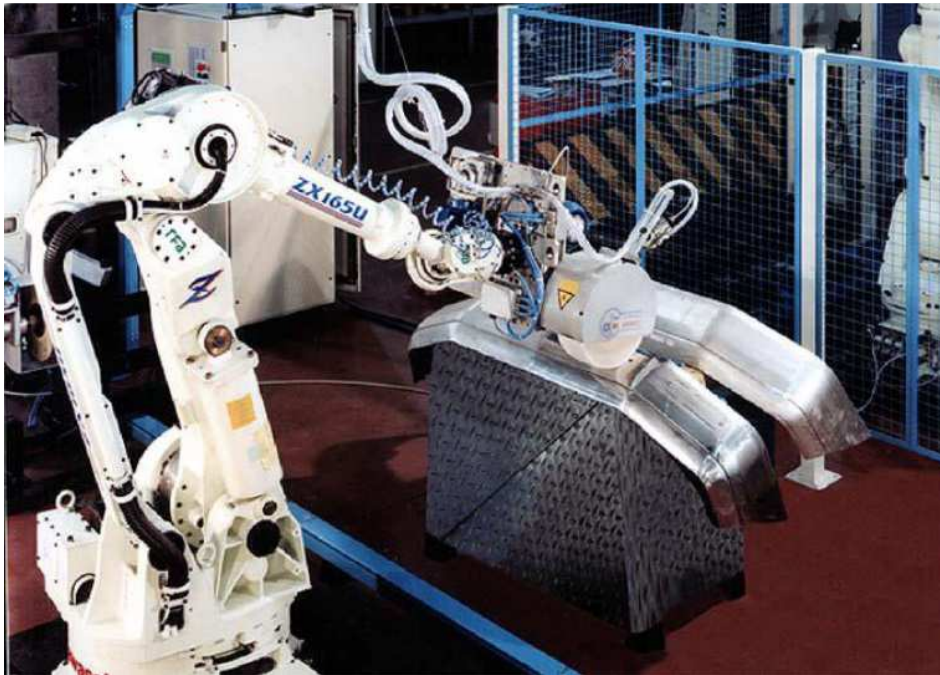


Figura 1.1 - Robô em operação de acabamento (polimento) [2]

1.1.1 Robôs industriais

A automatização das operações de acabamento iniciou-se nos anos 50, recorrendo a máquinas simples e vocacionadas para apenas uma operação. Este tipo de máquinas não obteve grandes resultados práticos pois qualquer alteração na peça a produzir implicava muitas vezes enormes custos na alteração da máquina. Só mais tarde com o aparecimento da tecnologia CNC (comando numérico computadorizado) é que se conseguiu alcançar um melhor compromisso entre realização de operações e flexibilidade ao nível das peças a produzir, ainda que estas peças fossem de geometrias simples.

Nas máquinas CNC a alteração da geometria da peça a trabalhar não é um problema, pois apenas é necessário mudar o dispositivo de aperto e carregar um novo programa no controlador, o que, aliado à elevada rigidez apresentada por estas máquinas, permite grandes forças de contacto e tolerâncias mais apertadas. Contudo, com 5 graus de liberdade e normalmente dedicadas a uma só operação, as máquinas CNC (figura 1.2) apresentam restrições de acesso para algumas geometrias e baixa flexibilidade operacional. Assim sendo, a integração destas máquinas em linhas de produção ficou-se por linhas de grandes lotes de peças de geometria simples, continuando-se a recorrer a mão-de-obra humana e qualificada em peças de maior complexidade [3].



Figura 1.2 - Máquina CNC [4]

Ainda assim, com o desenvolvimento tecnológico evoluíram também os requisitos de qualidade das peças e os prazos de entrega das mesmas, ou seja, tolerâncias e rugosidades mais rigorosas, a ser entregues em prazos mais curtos. Estas novas exigências de produção tornam-se impossíveis de cumprir com uma linha de produção dependente de uma operação de acabamento final realizada por mão-de-obra humana.

É na resposta a tais necessidades que aparecem, integrados nas células de acabamento, os robôs industriais. Estes robôs garantem o melhor compromisso entre flexibilidade e volume de produção.

A gradual introdução de células robotizadas em aplicações de acabamento superficial permitiu às diferentes empresas testemunhar as diversas vantagens dessa mesma mudança.

Do ponto de vista económico, a introdução de robôs em operações de acabamento permite uma redução de custos com a mão-de-obra qualificada e reduz o desgaste das ferramentas e outros consumíveis, o que se reflete diretamente nos custos de fabrico. Outro fator a ter em conta é a velocidade de operação do robô, que reduz consideravelmente os tempos de fabrico e, quando associado a uma linha contínua de produção, reduz o “*bottleneck*”. Em comparação com operários especializados com máquinas dedicadas, a célula robótica apresenta um bom rácio preço/performance.

Ainda no que diz respeito à qualidade do processo de acabamento, a aplicação de robôs também tem vantagens. A elevada repetibilidade dos robôs associada a uma boa precisão de movimentos melhora a qualidade do acabamento. O facto do robô industrial poder dispor de 6 graus de liberdade, leva a uma melhoria no processo de obtenção de peças dotadas de uma geometria mais complexa. Outra melhoria introduzida por estes robôs foi a capacidade de troca rápida de ferramenta, o que aumenta a flexibilidade de operações.

A introdução de robôs alivou os operadores humanos destas tarefas repetitivas (figura 1.3), poeirentas e, por vezes, com libertação de gases tóxicos, evitando assim lesões e doenças profissionais.



Figura 1.3 - Linha de produção automática [5]

Mas, para algumas aplicações mais específicas o robô industrial só por si não garante controlo de todos os parâmetros necessários para as operações de acabamento. É neste sentido que aparecem os dispositivos auxiliares de controlo de força. Estes dispositivos, quando associados a robôs, permitem controlar mais parâmetros cruciais para as operações de acabamento.

1.1.2 Dispositivos de controlo de força

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo capaz de controlar força e posição. Assim sendo, analisaram-se alguns dispositivos deste género, com diferentes filosofias de controlo e modos de utilização.

1.1.2.1 Robô equipado com controlo de força

O sensor ATI DELTA IP60 (figura 1.4) é um exemplo de um dispositivo comercial, capaz de medir força e binário (6 eixos) que juntamente com o *software* de controlo do robô permite a implementação de controlo de força num robô industrial [6].



Figura 1.4 - Sensor de força ATI DELTA IP60

Este sensor, o seu *hardware* de interface e o *software* para dotar o robô com controlo de força, tem um custo na ordem dos 25 000 euros, o que é bastante elevado. Para além deste custo elevado, este tipo de solução pode ser considerado exagerado para a implementação de algumas operações de acabamento, pois possui capacidades que são subaproveitadas.

1.1.2.2 *PushCorp AFD81*

O dispositivo PushCorp AFD80 (figura 1.5) encontra-se classificado entre os dispositivos de controlo passivo de força (*Passive Compliance Force Device*). É um dispositivo uniaxial, em que a regulação de força é obtida através da variação de pressão nas câmaras de um cilindro pneumático. Esta variação de pressão pode ser efetuada manual ou eletricamente [7].

Este dispositivo utiliza um cilindro pneumático de baixo atrito, com corpo em vidro e êmbolo em grafite, associado a um sistema de guiamento linear, no qual a posição da carruagem é lida através de um sensor potenciômetro linear. Este dispositivo pode aplicar uma força máxima de 444N e apresenta um curso máximo de 40mm.

Este tipo de dispositivos podem ser integrados em soluções robóticas, utilizando robôs industriais comuns, que possuem apenas controlo de posição/velocidade, mas não controlo de força.



Figura 1.5 - PushCorp AFD80

Por se tratar de um dispositivo de controlo passivo de força, não existe um *feedback* para o controlador, o que significa que a força de contacto não é realmente medida e a trajetória programada pode não ser exatamente cumprida. Este tipo de controlo faz com que este dispositivo seja mais simples e económico, mas apenas adequado a operações mais simples.

1.1.2.3 PushCorp AFD 1200

O dispositivo PushCorp AFD1200 (figura 1.6), apesar de bastante idêntico ao anterior, difere num ponto essencial, a filosofia de controlo que, no caso deste, se trata de controlo ativo (*Active Compliance Force Device*). Ou seja, para funcionar, este dispositivo necessita de um controlador apropriado, que também é fornecido pelo fabricante, de modo a detetar automaticamente a carga e atuar de forma a compensar as acelerações. Isto permite que a força de contacto seja constante, independentemente da orientação e que a trajetória programada seja cumprida. Assim sendo, este dispositivo é mais flexível e apropriado para operações mais complexas, ainda que seja um sistema mais dispendioso. Para além desta diferença, este dispositivo também é capaz de aplicar uma força de 1112N [7].



Figura 1.6 - PushCorp AFD 1200

1.1.3 Dispositivo DROA

O dispositivo robótico para operações de acabamento de solas de sapato (DROA, figura 1.7), é um dispositivo desenvolvido em 2010 na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito de uma dissertação em Engenharia Mecânica, pelo Diogo Viana [8]. É importante também referir desde já que a presente dissertação vem dar continuidade ao desenvolvimento deste dispositivo, com inserção de novas funcionalidades de comando e uma nova configuração mecânica.



Figura 1.7 - Dispositivo DROA

Dispositivo automático para operações de acabamento

Este dispositivo (figura 1.8) é, como o próprio nome indica, um dispositivo robótico para auxiliar operações de acabamento de solas de sapato, desenvolvido com o intuito de responder a necessidades de um mercado bastante específico como o do calçado. Para tal, este baseia-se numa arquitetura em que o robô move a peça a trabalhar (um sapato), enquanto o dispositivo assegura o suporte da ferramenta. A força de contacto é assegurada por um cilindro pneumático com ambas as camaras pressurizadas, sendo o ajuste de pressão realizado manualmente. O dispositivo apresenta um grau de liberdade, conseguido através da utilização de uma mesa linear, em que a sua posição pode ser medida. Outro facto importante acerca desta solução é o de trabalhar contra um batente mecânico, sendo o desvio desta posição, causado por um ultrapassar da força de contacto pré-programada. O deslocamento da posição de trabalho é enviado para o controlador do robô de modo a este alterar a velocidade da sua trajetória. Uma vez que o robô permite uma colocação da peça em qualquer posição e orientação, o único grau de liberdade do dispositivo auxiliar garante uma perpendicularidade da força de contacto. Ainda sobre este dispositivo importa referir que é capaz de exercer uma força entre 0.05 N e 55 N, com uma pressão fornecida entre 0 e 0.7 MPa.

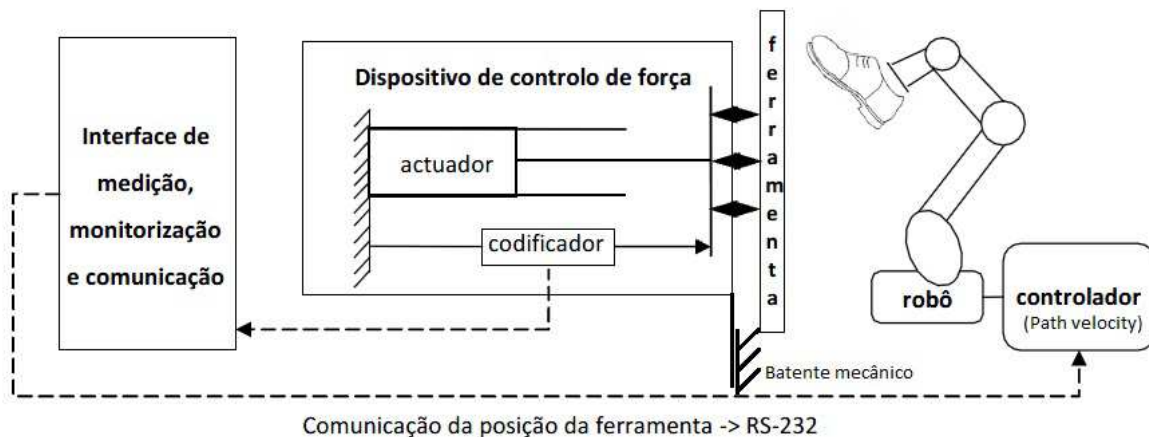


Figura 1.8 - Princípio de funcionamento do dispositivo DROA

1.2 Objetivos do trabalho

Tendo como ponto de partida o dispositivo DROA acima apresentado, a presente dissertação propõem uma evolução deste dispositivo, utilizando nova estrutura mecânica e implementando novas funcionalidades ao nível de comando e controlo pneumático. Tendo isto em conta, foram definidos alguns requisitos para o dispositivo a desenvolver:

- O novo dispositivo deve ser concebido de modo a poder auxiliar operações de acabamento mais genéricas, não sendo apenas vocacionado para o acabamento de sapatos;
- O dispositivo deve ser capaz de operar em paralelo com um robô industrial *standart* ou diretamente com operador;
- A capacidade de força deve ser obtida através de um cilindro pneumático de baixo atrito, no qual a pressão nas suas camaras deve ser controlada automaticamente, tanto recorrendo a duas válvulas proporcionais reguladoras de pressão como a uma servo-válvula direcional 5/3;
- O dispositivo deve ser capaz de controlar a posição no eixo linear, sendo assim capaz de seguir uma trajetória e de controlar a força de contacto em ambos os sentidos do seu eixo;
- Além da comunicação com o robô, este novo dispositivo deve ser capaz de comunicar com o *driver* da ferramenta;
- A nova solução deve ser fechada, autoportante e com eletrónica incorporada, garantindo um isolamento adequado aos componentes eletrónicos, provocadas pelas vibrações da ferramenta e processo;
- O projeto do dispositivo deve ter em conta um sistema de fixação flexível, tanto para o acoplamento do dispositivo, como para o suporte da ferramenta/peça de trabalho.

Além deste requisitos já definidos, o projeto do novo dispositivo deve ainda ter em conta a utilização, sempre que possível, de material já existente no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos, seguidos pelas Referencias e Anexos.

Começa com este primeiro capítulo introdutório, no qual se define os objetivos e se faz uma pequena introdução ao tema.

O segundo capítulo é denominado **Desenvolvimento do dispositivo**, e nele é feito um estudo sobre o princípio de funcionamento do dispositivo, seguido do projeto mecânico e pneumático.

O terceiro capítulo, intitulado **Desenvolvimento do sistema eletrônico de comando**, relata a construção da eletrônica de comando, desde o desenvolvimento da arquitetura de comando aos componentes e comunicações utilizados.

No quarto capítulo é feita uma descrição do *software* desenvolvido para comandar o sistema, e do modo mais específico como funciona o programa. A este capítulo é chamado **Desenvolvimento do *software* de controlo**.

Finalmente, o quinto capítulo é dedicado a **Conclusões e trabalhos futuros**, no qual são tecidas as conclusões finais do trabalho, bem como sugeridos alguns trabalhos futuros.

2 Desenvolvimento do dispositivo

2.1 Introdução

Neste capítulo é feito um estudo sobre o desenvolvimento do dispositivo pretendido, começando por uma abordagem ao princípio de funcionamento do mesmo, seguido do projeto mecânico e do sistema pneumático de atuação, dando também atenção a todos os componentes necessários à sua implementação.

Pretende-se, assim, criar um novo dispositivo auxiliar de acabamento controlado em força, respeitando os requisitos construtivos.

2.2 Princípio de funcionamento do dispositivo de acabamento

O dispositivo auxiliar de acabamento que é proposto construir, pretende auxiliar e melhorar o processo produtivo das operações de acabamento. Para tal, existem diversos aspetos da sua arquitetura que devem ser estudados previamente, de modo que as decisões e escolhas de soluções de projeto sejam convenientemente ponderadas, o mais conscientemente possível.

Assim sendo, um dos primeiros aspetos a ter em conta é a localização do dispositivo, ou seja, se este tem como objetivo ser montado numa mesa auxiliar ou se, por outro lado, é pretendido que este seja transportado pelo robô. Como a configuração de montagem em mesa auxiliar apresenta a clara vantagem de não estar limitada pela capacidade de carga do robô, é adotada esta configuração. Por outro lado, também permite o uso do dispositivo em modo autónomo, sem necessidade de interligação a um robô.

Outra definição bastante importante no estudo deste dispositivo diz respeito aos parâmetros de corte, visto estes terem influencia direta na qualidade final apresentada. Ainda que para o projeto do dispositivo alguns destes parâmetros não tenham qualquer influência, tais como o tipo de ferramenta de corte e o diâmetro e número de dentes destas, outros há que devem ser considerados.

É necessário ter em conta o **sentido de corte**, visto este depender do tipo de material a maquinar (figura 2.1). Assim sendo, e como se pretende projetar um dispositivo auxiliar a operações de acabamento flexível, o sentido de corte deve ser definido pelo utilizador.

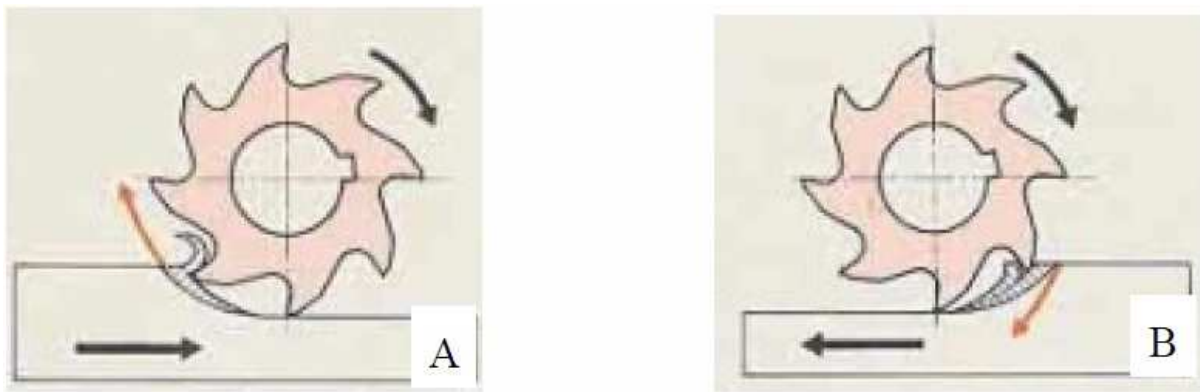


Figura 2.1 - Fresagem cilíndrica discordante (A) e concordante (B) [9]

Outro parâmetro de corte importante é a **potência de corte**. Como se pode ver nas equações que se seguem, esta é diretamente influenciada por diversos fatores, e ainda que vários destes fatores não sejam controlados pelo controlador do dispositivo, três parâmetros devem ser tidos em conta, a **velocidade de corte**, a **velocidade de avanço** e a **pressão específica de corte**.

$$P_c = F_c \times V_c$$

P_c – potência de corte [W]

V_c – velocidade de corte [m/s]

F_c – força de corte [N]

$$F_c = K_c \times s$$

K_c – pressão específica de corte [N/mm²]

s – secção de corte [mm²]

$$s = h \times a_c$$

h – largura de corte [mm]

a_c – avanço de corte [mm]

Assim sendo, e mais uma vez tendo em conta a flexibilidade pretendida para o dispositivo, estes parâmetros devem ser definidos pelo utilizador dependendo da aplicação de acabamento em causa.

Assim, o princípio de funcionamento do sistema (figura 2.2) considera que o dispositivo está fixo na mesa auxiliar, suportando ou a ferramenta ou a peça de trabalho, enquanto o robô ou um utilizador humano executa uma trajetória com o outro elemento.

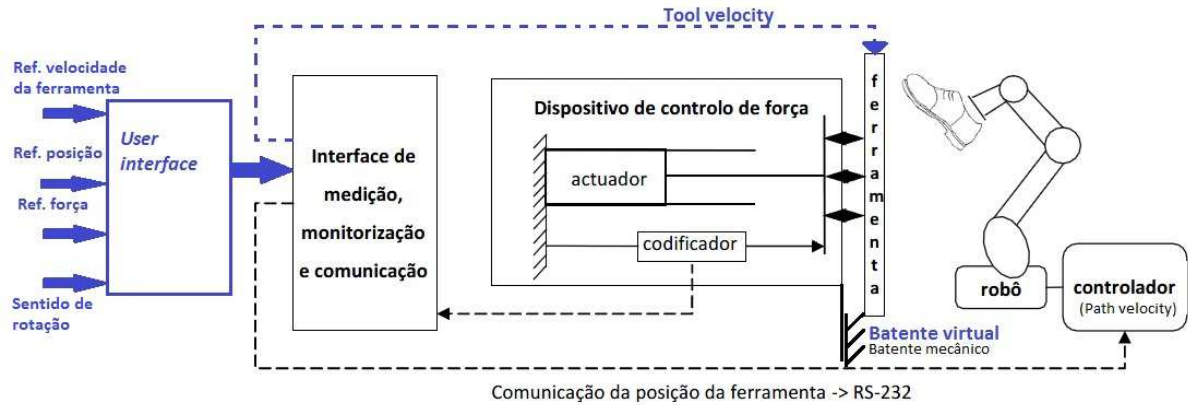


Figura 2.2 - Princípio de funcionamento do novo dispositivo

O utilizador por sua vez deve definir o sentido de corte, a velocidade de corte, a velocidade de avanço e força de contacto desejada. Visto um dos requisitos envolver a capacidade de seguir trajetórias, pode ser necessário também a introdução dessa mesma trajetória.

Com o dispositivo a auxiliar a operação de acabamento, a sua posição/trajetória é medida através de um *encoder* (figura 2.3). Esta leitura por sua vez deve ser transmitida aos vários elementos a controlar, ou seja, este sinal deve ser comunicado ao robô, permitindo que este altere a velocidade da trajetória, ao controlador da ferramenta, de modo a este alterar a velocidade de corte, e às válvulas pneumáticas, de modo a que a força de contacto possa ser alterada, se desejado. Com isto o dispositivo deve ser capaz de auxiliar corretamente a operação de maquinagem, permitindo uma boa qualidade final do processo.

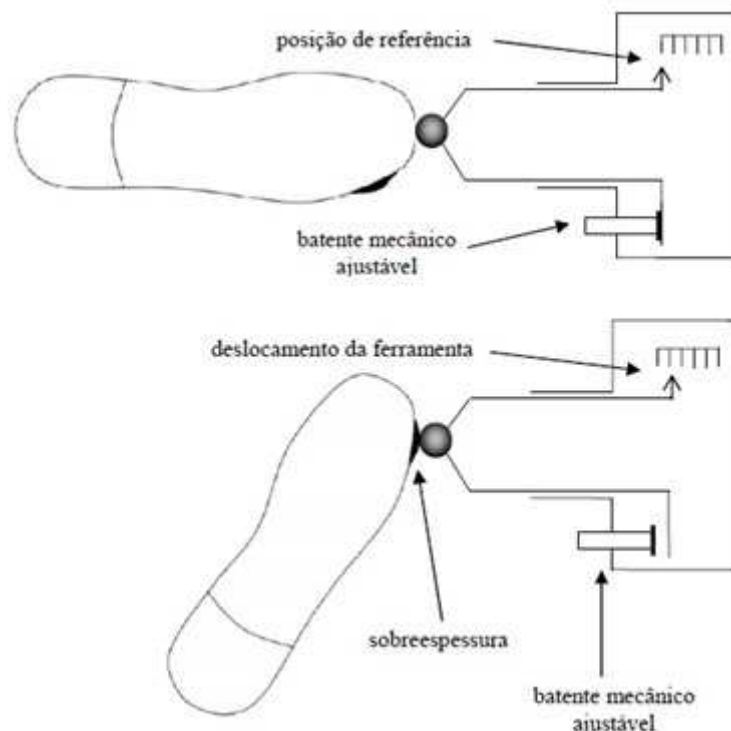


Figura 2.3 - Leitura do deslocamento pelo *encoder*

2.3 Projeto mecânico

Uma das principais evoluções em relação ao dispositivo já existente diz respeito ao projeto mecânico. Este deve responder a alguns requisitos principais, tais como, ser uma solução fechada, autoportante e com todo o *hardware* eletrônico e pneumático incorporado, isolado de vibrações. Além deste requisitos definidos no início da dissertação, também foi decidido que deve ser uma solução para montagem em mesa auxiliar, em detrimento duma solução de acoplamento ao robô. Foi também definido que tanto o método de fixação à mesa auxiliar, como a fixação à ferramenta/peça de trabalho deve ser expedito.

Com isto presente, foi concebida uma estrutura mecânica modular, de 3 módulos: uma base fixa (figura 2.4 A), a fixar à mesa auxiliar; uma mesa móvel (figura 2.4 B), que transporta a ferramenta/peça de trabalho; um compartimento de comando (figura 2.4 C), isolada das vibrações provocadas pelas operações a realizar. Assim, e para facilitar a interpretação dos passos necessários no desenvolvimento do projeto mecânico, estes são apresentados de forma individualizada.

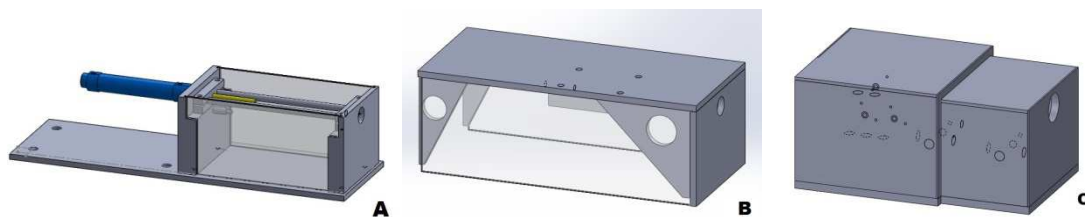


Figura 2.4 - Base fixa (A), mesa móvel (B) e compartimento de comando (C)

Importante é também referir que devido há necessidade de existir um eixo de movimento linear, todo o projeto mecânico é desenvolvido em torno de uma mesa linear. Para tal efeito foi utilizada uma mesa linear já existente no laboratório de robótica (figura 2.5 A) onde o projeto decorre. A nível de projeto foi feita uma representação dessa mesa já existente (figura 2.5 B). A mesa tem um curso útil de 126mm, carro com 128mm×111mm e utiliza um guiamento por casquilhos em varões de 8mm de diâmetro.

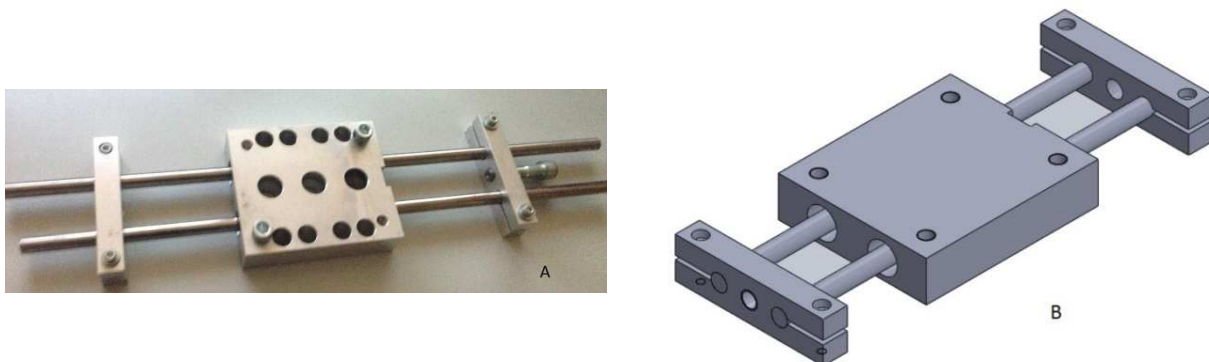


Figura 2.5 - Mesa linear existente (A) e representada (B)

2.3.1 Base fixa

O componente mais relevante deste módulo é a base do dispositivo, concebida de modo a tornar a solução autoportante. Ou seja, esta base comporta todo o dispositivo, sendo também o maior componente deste. As suas dimensões são aproximadamente as do próprio dispositivo [640mm×200mm], excetuando na altura.

Outra dos componentes da base são os dois suportes da mesa linear, sendo estes necessários para a elevação da própria mesa (figura 2.6). Esta elevação é necessária pois a mesa linear deve estar colocada o mais próxima possível de carga que vai suportar, de modo a minimizar momentos fletores. A altura do dispositivo é condicionada pela altura das válvulas reguladoras de pressão, como vai ser explicado mais à frente. Ainda que não, com tal objetivo, esta altura permite que os instrumentos de medição (*encoder*) e segurança (fins de curso) possam ser colocados sob a mesa linear. Estes suportes estão apoiados na base do dispositivo sendo fixos por uma ligação aparafusada.

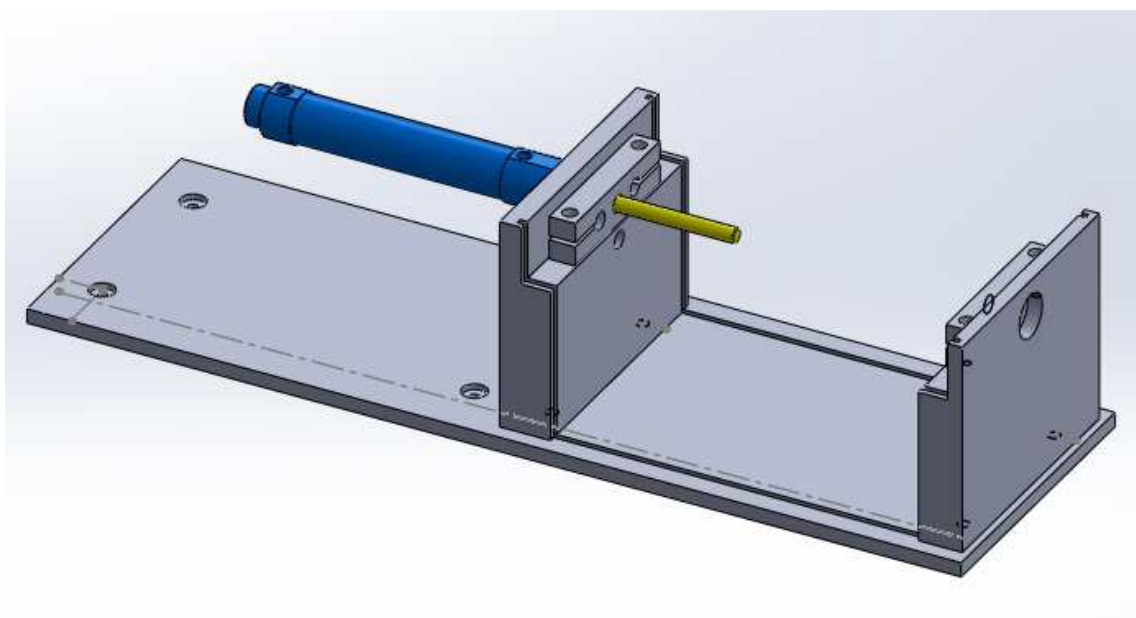


Figura 2.6 - Base e suportes da mesa linear

Como também se vê na figura 2.6, o carro é colocado nos suportes acima descritos. De referir também o facto de estes suportes apresentarem diferenças entre ambos, ou seja, no central (esquerda na figura 2.6) existe um furo roscado, no qual vai ser fixado o cilindro, enquanto no exterior (direita na figura 2.6) esse furo é passante, servindo apenas para ajuste no batente de segurança da mesa linear. Outra diferença entre os suportes encontra-se no furo roscado existente no suporte central, destinado a um amortecedor, colocado de modo a evitar choque bruscos no cilindro pneumático. Estes suportes foram ainda projetados para tornarem a solução fechada, de modo a evitar que poeiras e sujidades causadas pelas operações de acabamento entrem para o interior do dispositivo.

É também com o objetivo de manter a solução fechada que são acrescentadas duas laterais de acrílico, inseridas em rasgos efetuados tanto na base como no suporte. Foi escolhido o

Dispositivo automático para operações de acabamento

acrílico para este fim pois, além de leve e de baixo custo, é um material transparente permitindo a visualização do mecanismo e a deteção de eventuais avarias.

A figura 2.7 representa uma vista explodida da base fixa, na qual se pode ver todos os componentes anteriormente descritos, bem como a sua colocação relativa.

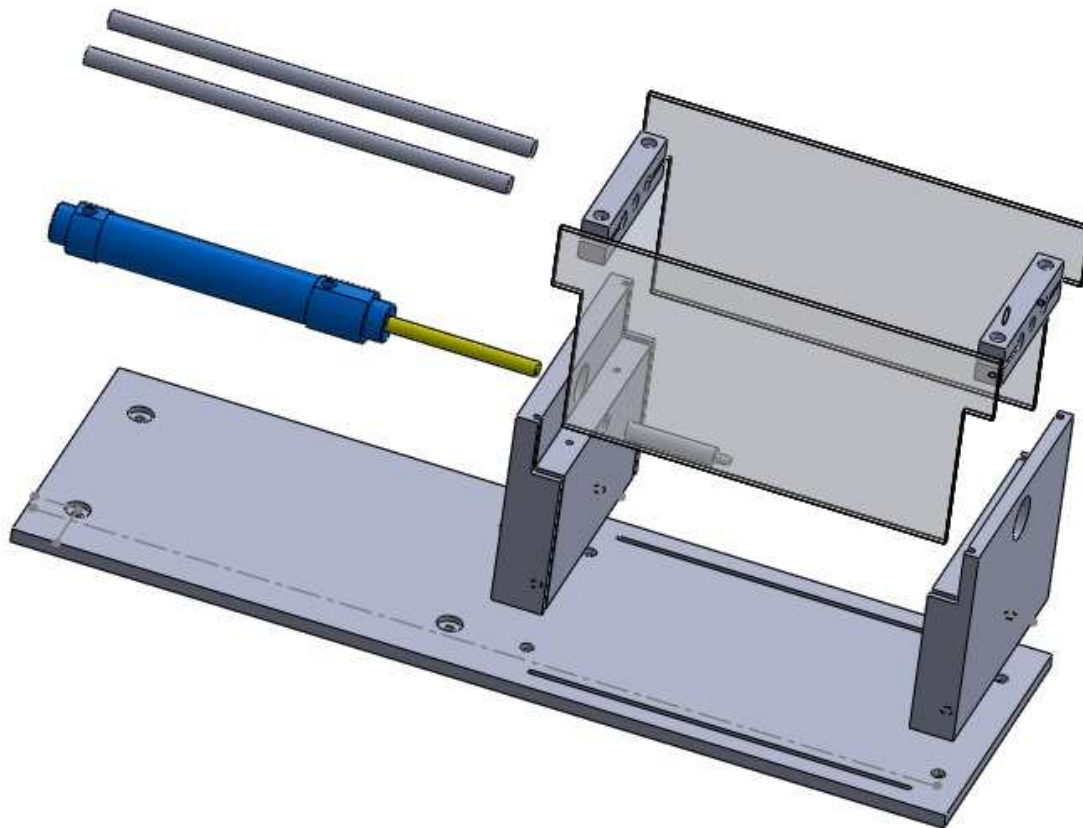


Figura 2.7 - Vista explodida da base fixa

2.3.2 Mesa móvel

Como foi referido anteriormente, a mesa móvel é o módulo que se move com o grau de liberdade do dispositivo. Ainda que existente no laboratório, esta mesa linear necessita de ser alterada, de modo a permitir o acoplamento entre esta e a haste do cilindro. Para tal é projetado um furo roscado num das laterais do componente móvel, como se vê na figura 2.8 B. Entre a haste do cilindro e o componente do carro é montada uma junta, de modo a serem absorvidas quaisquer não-linearidades, bem como alguns choques, de modo a não danificar o cilindro pneumático. A junta escolhida é a SMC JA20-10125 (figura 2.8 A).

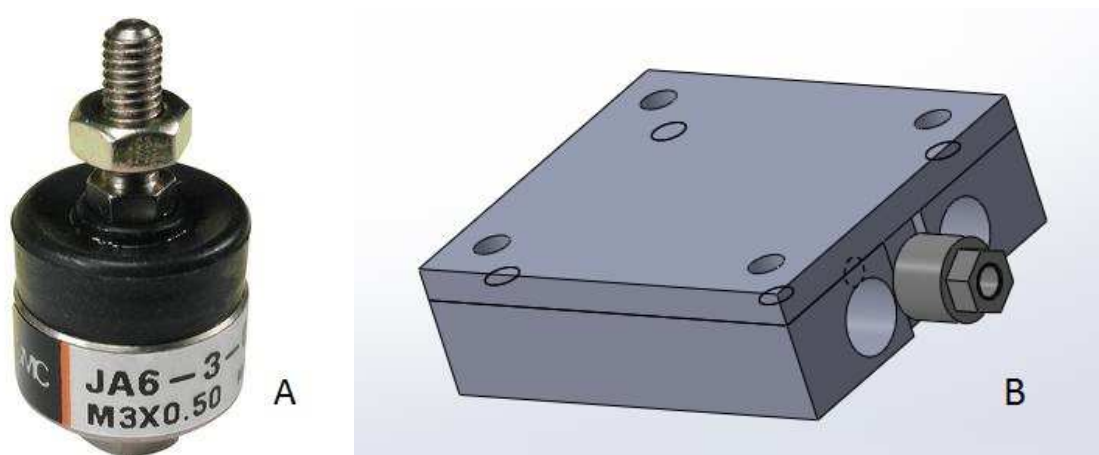


Figura 2.8 - Junta SMC JA real (A) [10] e representada (B)

Como também se pode ver na figura 2.8, a mesa linear foi dotada de uma placa de espaçamento, visto que a parte móvel tem de estar elevada em relação a todos os outros elementos, e a mesa só por si não apresentava altura suficiente.

Os dois componentes principais deste módulo (figura 2.9) são a tampa superior e a frente do dispositivo. São estes os componentes que estão projetados para suportar a ferramenta/peça a trabalhar. A opção de dotar ambos os componentes com esta função torna o dispositivo bastante mais flexível, pois assim permite a montagem da ferramenta/peça a trabalhar tanto na vertical como na horizontal. A frente do dispositivo leva ainda um furo passante de modo a ser possível ajustar o batente mecânico da mesa linear. A opção de aumentar a flexibilidade do sistema criou a necessidade de reforçar o suporte da frente, sendo para tal necessário o acréscimo de dois componentes triangulares, um de cada lado, como cantoneiras entre a tampa superior e a frente do dispositivo, como se pode ver na figura 2.9. Estas cantoneiras foram dotadas de furos passantes, de modo a diminuir a massa móvel do sistema.

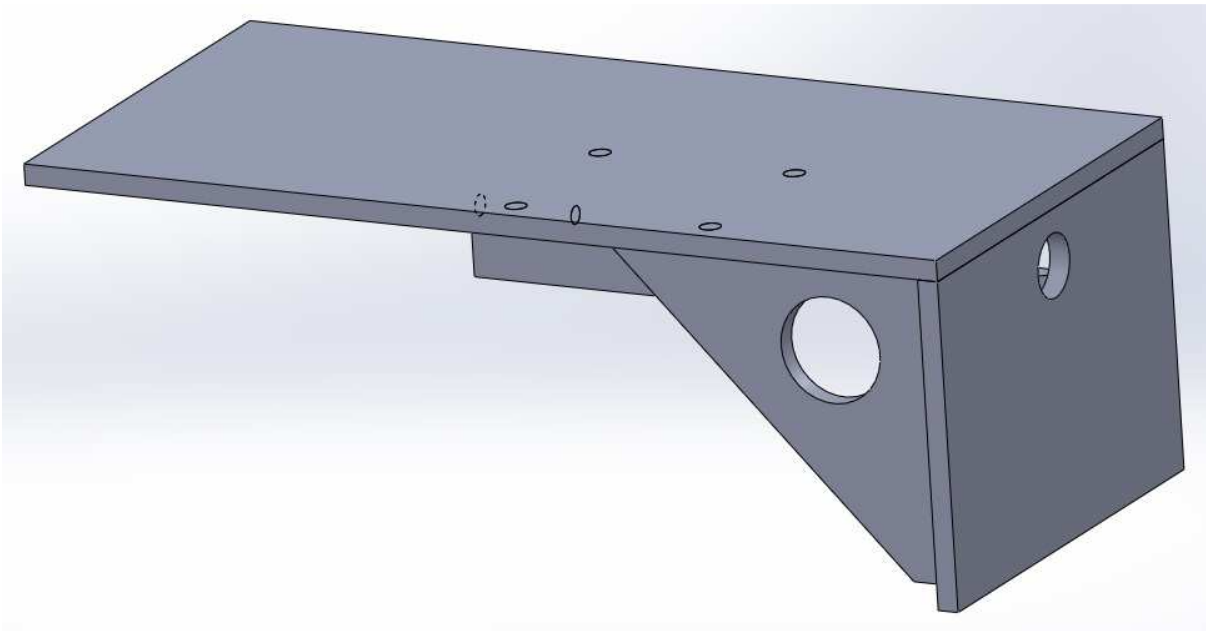


Figura 2.9 - Cantoneira entra tampa superior e frente

Tal como na base fixa do dispositivo, foi também acrescentado duas laterais de acrílico, de modo a garantir que o sistema seja tao fechado quanto possível, ainda que permitindo a visualização para o interior. De modo a melhor fixar estas laterais de acrílico, foram também adicionados duas cantoneiras mais pequenas na parte posterior da tampa superior, sendo que também estas foram furadas de modo a diminuir a sua massa.

Na figura 2.10 é apresentada uma vista explodida deste módulo, que permite ver a colocação relativa de todos os componentes.

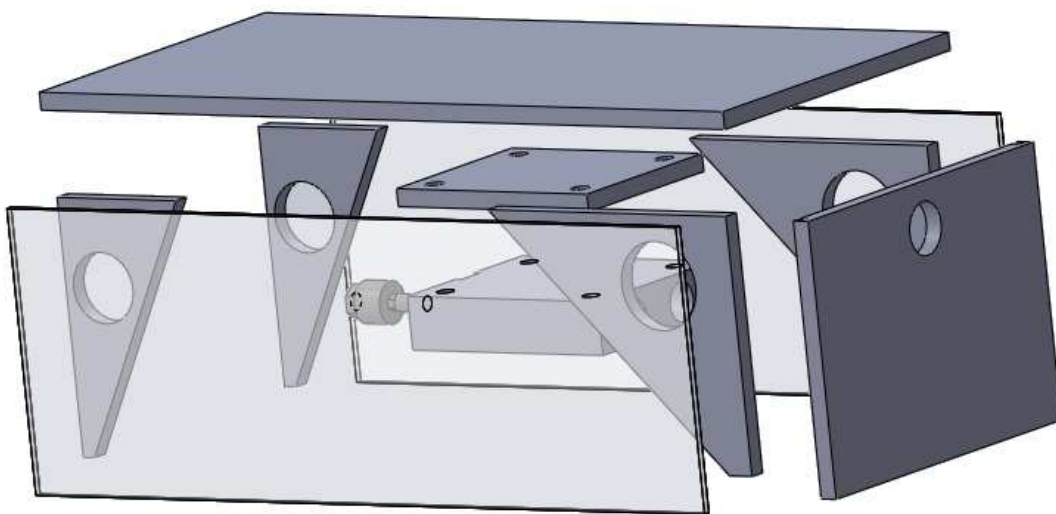


Figura 2.10 - Vista explodida da mesa móvel

2.3.3 Compartimento de comando

Este último módulo é o mais complexo de todo o sistema. Isto acontece devido há necessidade de ocupar o mínimo espaço possível, algo que não se levantava nos outros módulos visto estarem condicionados a nível de comprimentos pelo curso do carro, e a nível da altura por este módulo.

Esta opção de construir um compartimento separada para o comando surgiu devido à necessidade de isolar os componentes elétricos e as válvulas pneumáticas de vibrações. Para tal, entre este módulo e a base do dispositivo, foram pensados sinoblocos, de modo a conseguir o isolamento pretendido.

Outro cuidado a ter no projeto deste módulo é o isolamento, tanto quanto possível, entre os diversos tipos de elementos que este comporta, tais com a fonte de alimentação, os sistemas pneumáticos e o espaço destinado às cartas de comando. Este isolamento é desejado de modo a evitar interferências magnéticas entre os elementos elétricos.

Assim, a estrutura do compartimento de comando é composta por uma placa base e três paredes estruturantes (figura 2.11).

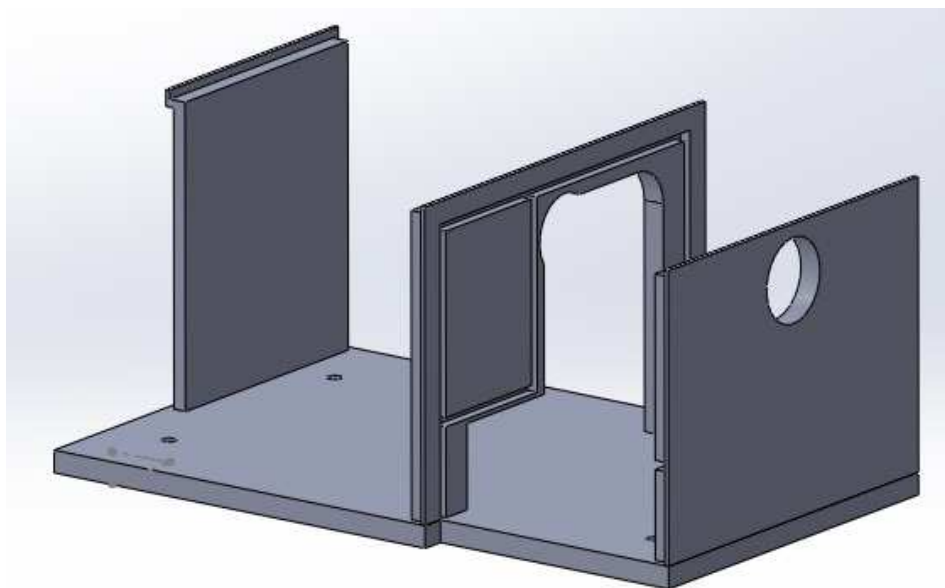


Figura 2.11 - Chão e paredes estruturais do compartimento de comando

Como se pode ver na figura 2.11, as três paredes estruturais tem as suas particularidades. Na parede da frente (direita na figura 2.11) existe um furo passante, de modo a permitir o alojamento do corpo do cilindro pneumático. Assim como na frente, a parede central também necessita de um furo idêntico, ainda que nesta só seja visível uma porção desse furo. Da frente importa ainda dizer que é ligeiramente mais estreita e baixa que as outras, visto que esta trabalha sob a mesa móvel. Os rasgos projetados ao longo das paredes têm como objetivo a colocação de laterais. A parede posterior, como também se pode ver na figura, não cobre toda a área posterior, sendo o que falta destinado à inserção das cartas eletrónicas.

Dispositivo automático para operações de acabamento

Entre a parede de frente e a parede central está projetada um compartimento isolado para a fonte de alimentação (figura 2.12), visto também ser este o elemento que requer maiores cuidados ao nível do isolamento eletromagnético.

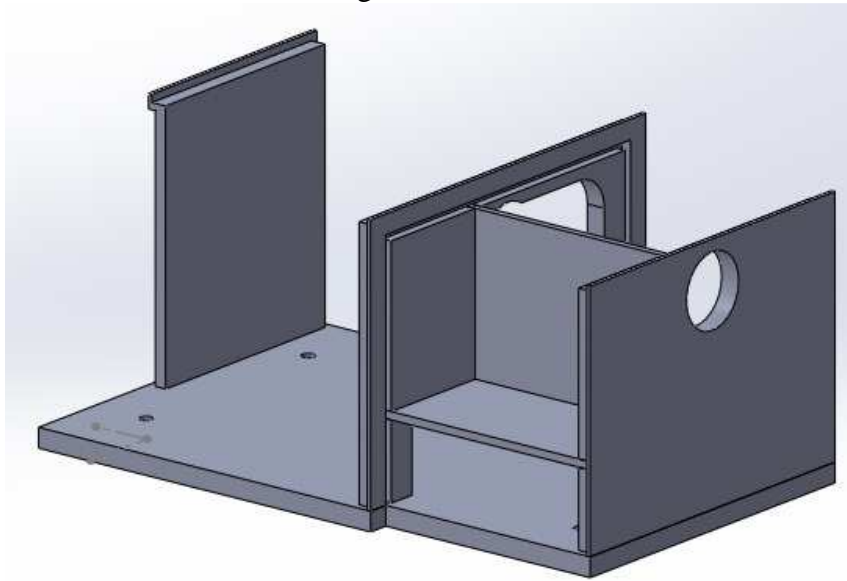


Figura 2.12 - Compartimento isolado para a fonte de alimentação

Para as cartas eletrónicas é necessário colocar no compartimento de comando uma *rack*, mas devido a questões de espaço optou-se por colocar apenas uma das laterais da *rack*, sendo a outra substituída pela própria lateral do compartimento. Esta opção permite poupar espaço para além de a lateral da *rack* adicionada proporcionar o isolamento necessário entre as cartas eletrónicas e as válvulas. A figura 2.13 permite ver a colocação da *rack* e da sua placa lateral, deixando já também o espaço definido para as cartas eletrónicas.

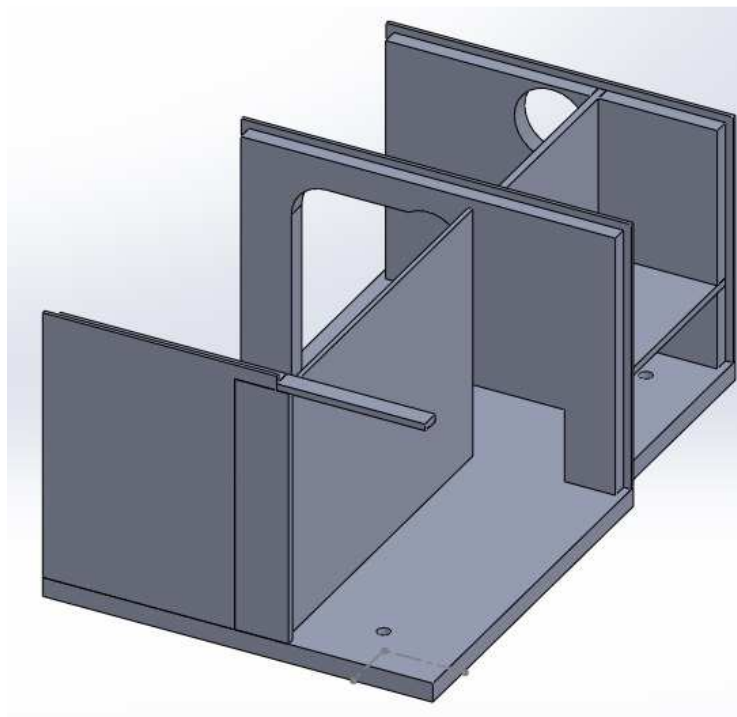


Figura 2.13 - Colocação da *rack* para as cartas de comando

O atravancamento do material pneumático é um dos maiores condicionantes ao nível do espaço necessário. Assim a solução obtida está representada na figura 2.14, sendo que foi tido em conta a necessidade de reduzir ao máximo a distância entre as válvulas e o cilindro. Todas as válvulas estão fixas na placa de base ou paredes do compartimento de comandos, sendo apenas colocado um suporte extra para a servo-válvula.

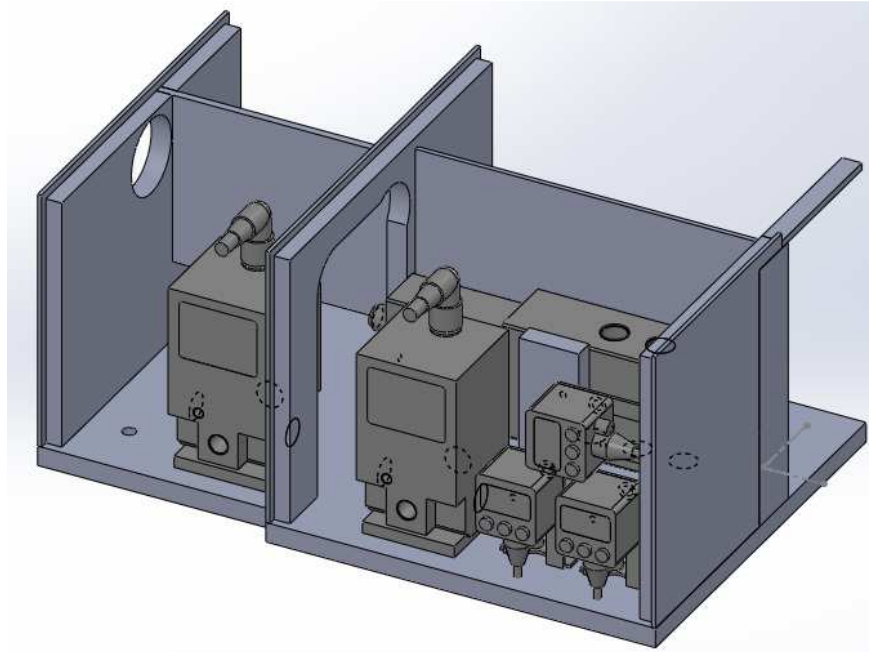


Figura 2.14 - Atravancamento das válvulas e transdutores pneumáticos

Para concluir a descrição deste módulo há que referir as laterais e tampas do próprio compartimento de comando (figura 2.15). Nestas o único motivo de realce é a inserção de janelas nas laterais direitas de modo a ser possível a visualização dos ecrãs das válvulas reguladoras de pressão e dos transdutores de pressão.

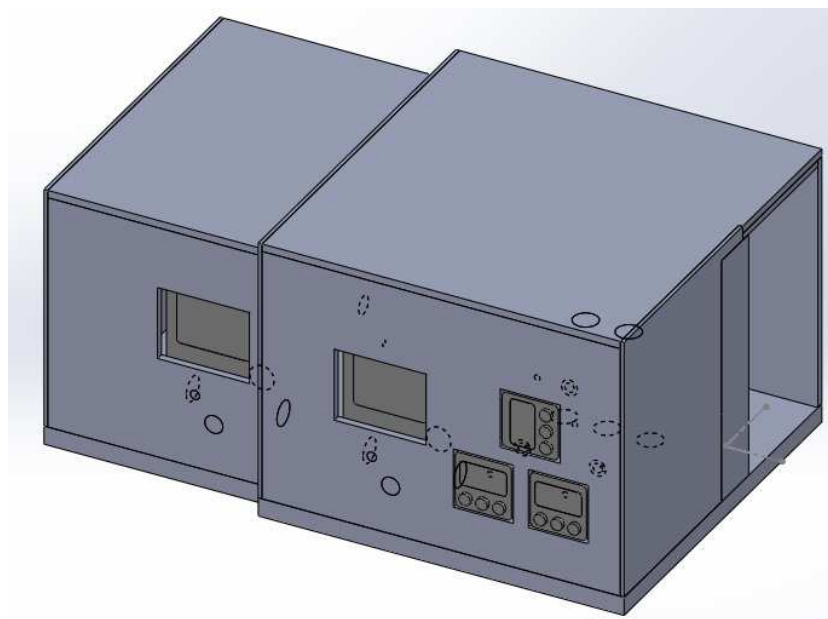


Figura 2.15 - Janelas nas laterais do compartimento de comando

Mais uma vez, de modo a complementar a explicação do módulo podemos ver na figura 2.16 uma vista explodida do compartimento de comando. Nesta vista foram apenas colocadas os componentes a produzir, sendo deixados de fora todas as válvulas, bem com a representação da *rack*.

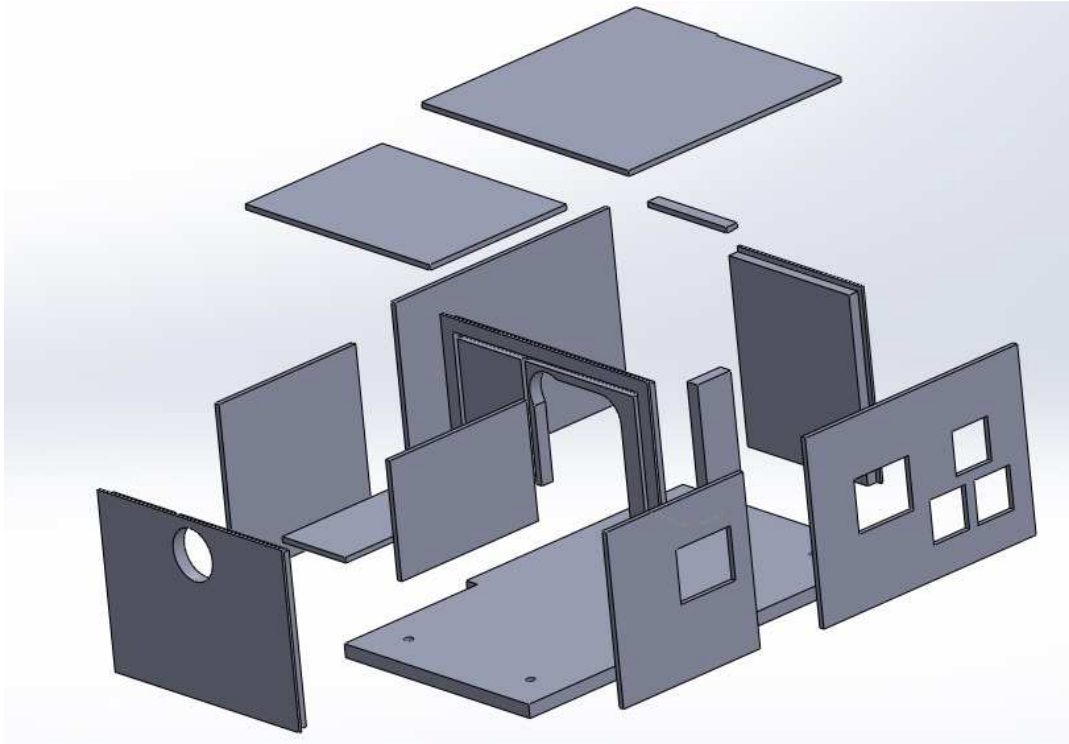


Figura 2.16 - Vista explodida do compartimento de comando

A figura 2.17 ilustra com algum pormenor a forma como os diversos módulos interagem uns com os outros. Para esta figura alguns dos componentes foram tornados transparentes para melhor visualização.

No Anexo A são apresentados os desenhos de definição e fabrico dos diferentes componentes projetados.

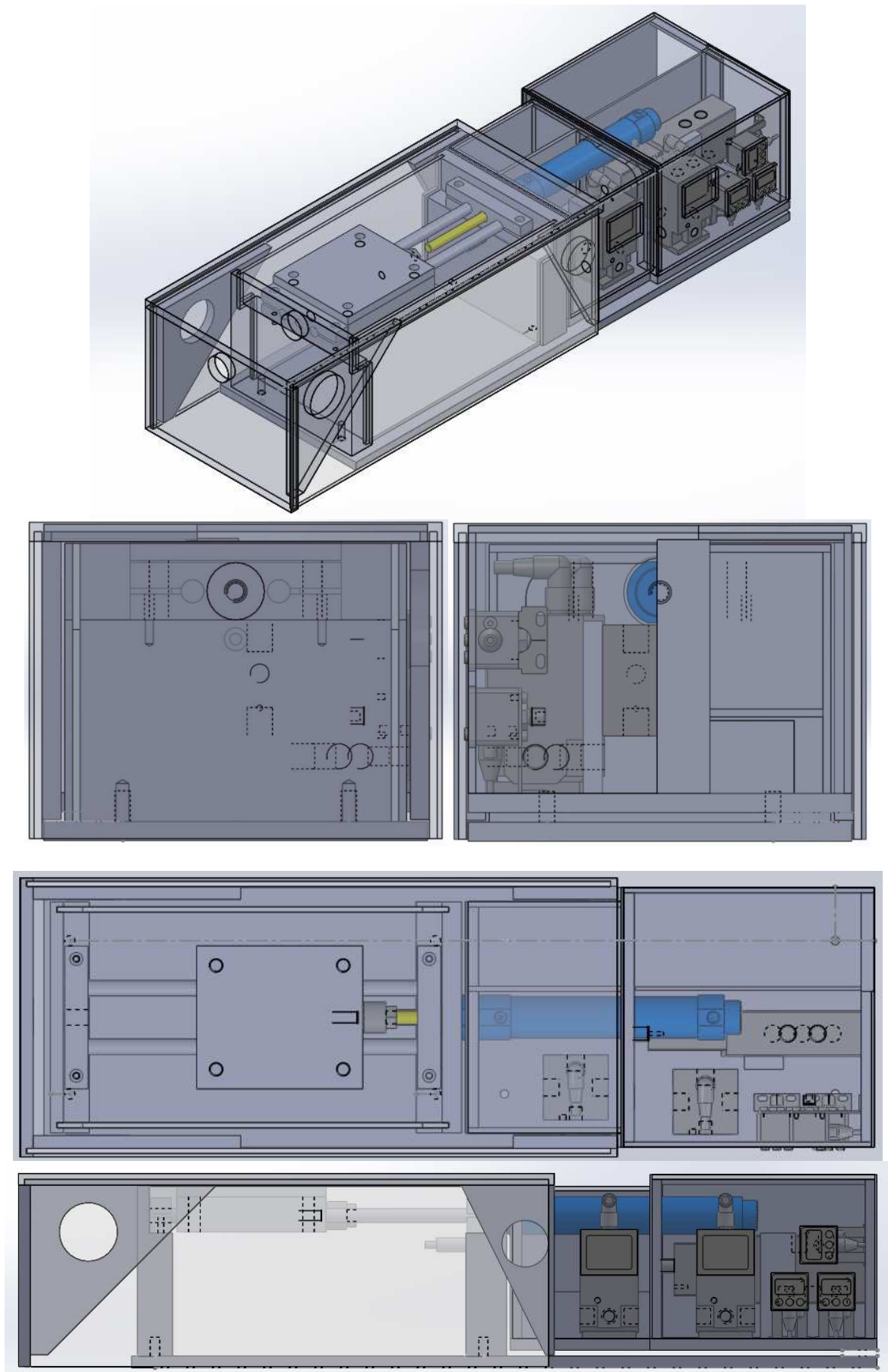


Figura 2.17 - Vistas pormenorizadas do dispositivo com os três módulos posicionados (vista isométrica, vista de topo esquerdo, vista topo direito, vista de cima e vista da lateral direita, respetivamente)

2.4 Projeto do Sistema Pneumático

O sistema de acionamento do dispositivo, como já foi referido anteriormente, é um sistema pneumático. Isto significa que, o movimento do carro, bem como a capacidade de força do dispositivo, são controlados pelo sistema pneumático.

Fundamentalmente, o dispositivo utiliza um cilindro de duplo efeito de baixo atrito, no qual são controladas as pressões em ambas as camaras de modo a controlar a força resultante ou o posicionamento do cilindro. A pressão em cada uma das camaras do cilindro é também medida através de transdutores de pressão, de modo a que exista *feedback* e o sistema seja controlado ativamente.

Um dos requisitos deste dispositivo é a possibilidade de ser controlado através de duas válvulas reguladoras de pressão ou através de uma servo-válvula direcional 5/3. Assim, foram projetados dois sistemas pneumáticos, sendo que todos os componentes são comuns aos dois exceto as válvulas.

Para o primeiro caso em que são utilizadas duas electroválvulas reguladoras de pressão, o funcionamento do sistema consiste em associar a cada uma das camaras do cilindro uma electroválvula proporcional, controlando individualmente a pressão em cada camara (figura 2.18). Isto faz com que seja possível controlar a força exercida pelo cilindro.

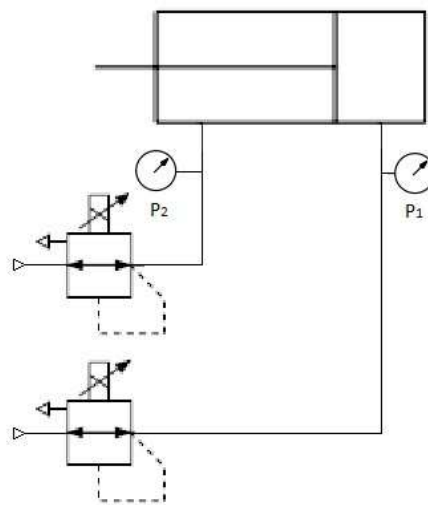


Figura 2.18 - Montagem do circuito pneumático com duas válvulas reguladoras de pressão

Este modo de funcionamento permite ainda controlar a rigidez do sistema, ou seja, para a mesma força resultante é possível obter distintas dinâmicas de resposta, o que torna o dispositivo mais versátil. Este controlo efetua-se alterando a gama de pressões nas camaras do cilindro para a mesma força resultante, ou seja, para a mesma diferença de pressão (mesma força de contacto), se alterar a pressão em cada uma das camaras, aumentando ou diminuindo as duas, altera a rigidez do sistema. Esta particularidade pode também ser considerada um grau de liberdade, o que faz com que esta montagem apresente dois graus de liberdade (força e rigidez).

Na tabela 1 podemos consultar os valores de força teórica do atuador, ainda que no cálculo deste não tenham sido considerados os atritos e inercias do sistema, sendo estes valores calculados através da expressão:

$$F = P_1 \times A_1 - P_2 \times A_2 \quad [S.I.]$$

Tabela 1 - Força nominais em função das pressões nas válvulas reguladoras de pressão

Força [N]		P ₁ [Mpa]							
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
P ₂ [Mpa]	0	-	49,1	98,2	147,3	196,3	245,4	294,5	343,6
	0,1	-	7,9	56,9	106,0	155,1	204,2	253,3	302,4
	0,2	-	-	15,7	64,8	113,9	163,0	212,1	261,1
	0,3	-	-	-	23,6	72,6	121,7	170,8	219,9
	0,4	-	-	-	-	31,4	80,5	129,6	178,7
	0,5	-	-	-	-	-	39,3	88,4	137,4
	0,6	-	-	-	-	-	-	47,1	96,2
	0,7	-	-	-	-	-	-	5,9	55,0

No outro modo de funcionamento, no qual é utilizado uma servo-válvula direcional 5/3 (figura 2.19), o controlo da rigidez já não é possível. Isto deve-se ao facto de a pressão nas duas camaras do cilindro passarem a ser dependentes uma da outra, sendo na mesma possível atingir os mesmos valores de força (ou bastante próximos, devido a perdas de carga nas válvulas diferentes) mas apenas numa gama de pressão.

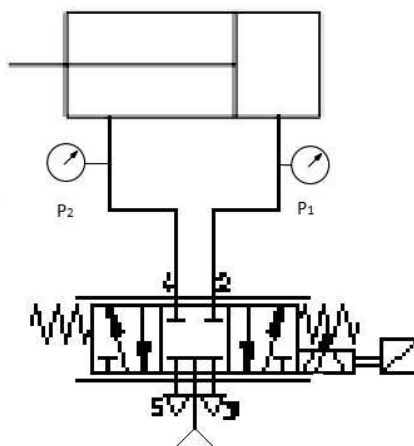


Figura 2.19 - Montagem do circuito pneumático com uma servo-válvula 5/3

Contudo, este modo de funcionamento também apresenta as suas vantagens, permitindo um posicionamento variável do carro, seguindo uma dada trajetória. Esta característica está associada à capacidade dinâmica da válvula, que é superior neste caso, mas também ao facto de apenas ser necessário controlar uma válvula, facto que simplifica o controlo.

A mudança entre os dispositivos é feita manualmente, trocando a ligações ao cilindro de uma das configurações para a outra. Esta solução foi a adotada com vista a manter um volume morto reduzido entre as válvulas e o cilindro.

2.4.1 Equipamento pneumático

Os componentes dos dois circuitos pneumáticos são um cilindro pneumático, duas electroválvulas reguladoras de pressão, três transdutores de pressão digitais e uma servo-válvula direcional. Todos os componentes, exceto as válvulas, são partilhados por ambos os circuitos.

O cilindro pneumático é comercializado pela SMC, segundo a referência MQMLB25TN-100D (figura 2.20). Trata-se de um cilindro de baixo atrito, vedação metálica, com 25mm de diâmetro do êmbolo e 10mm de diâmetro da haste, um curso total de 100mm e conexão pneumática 1/8".



Figura 2.20 - Cilindro SMC MQMLB25TN-100D [11]

As electroválvulas reguladoras de pressão são também comercializadas pela SMC, e apresentam a referência ITV2050-21N2BL3-Q (figura 2.21). Esta apresenta um intervalo de pressões de 0 a 0,9MPa, tensão de alimentação de 24 V DC, tensão de comando de 0 a 5 V DC e conexão pneumática de 1/4". A válvula contém um *display* para monitorização das pressões, para além de uma saída analógica [1 a 5V DC].



Figura 2.21 - Válvula reguladora de pressão SMC ITV2050-21N2BL3-Q [12]

Os transdutores de pressão, também comercializados pela SMC, são do tipo ISE40A-N01-R-D-X50 (figura 2.22.), sendo por isso, para uma gama de pressões de -0,1 a 1,000MPa, entrada pneumática 1/8", tensão de alimentação de 24V DC e saída em tensão de 0,6 a 5V DC.



Figura 2.22 - Transdutor de pressão ISE40A-N01-R-D-X50 [13]

Por último, a servo-válvula direcional é Festo, com a designação MPYE-5-1/4-010-B (figura 2.23). Trata-se de uma válvula 5/3, com conexão de 1/4" e tensão de comando de 0 a 10V DC. Apresenta ainda uma tensão de alimentação de 24V DC, um caudal máximo de 1400l/min e uma frequência crítica de 90Hz.



Figura 2.23 - Servo-válvula 5/3 Festo MPYE-5-1/4-010-B [14]

Estes componentes já se encontravam disponíveis no laboratório de Robótica do departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pelo que este trabalho de dissertação não envolveu a sua seleção.

2.5 Conclusão

Neste capítulo foi desenvolvido o princípio de funcionamento do dispositivo de acabamento, bem como os parâmetros gerais de funcionamento. Em seguida foi efetuado o projeto mecânico e pneumático do sistema, de modo a este responder aos requisitos enunciados nos objetivos.

Foi idealizado que o dispositivo deve ser exterior ao robô, sendo montado numa mesa auxiliar. Também foi definido quais os parâmetros a controlar pelo sistema, sendo estes a força de contacto, a velocidade de passagem do robô, o sentido de rotação da ferramenta e a velocidade desta.

Em seguida foi desenvolvido o projeto mecânico de modo a que o novo dispositivo seja fechado, autoportante, com a eletrónica incorporada e isolada de vibrações. Para este desenvolvimento o dispositivo foi dividido em três módulos separados, sendo eles a base fixa, que é a base de todo dispositivo, a mesa móvel, na qual estão todos os componentes que se deslocam sobre o grau de liberdade do sistema, e o compartimento de comando, no qual estão presentes todas as válvulas e eletrónica de controlo, sendo que esta está isolada das vibrações causadas pelos processos e ferramentas a ser utilizadas.

O dispositivo tem um atravancamento de 655mm×215mm×165mm e o seu curso de deslocamento do eixo linear é de aproximadamente 100mm. A estrutura foi projetada para ser construída em alumínio, pelo que o seu peso é da ordem dos 16kg. Considerando os componentes pneumáticos e eletrónicos, o dispositivo apresenta um peso global da ordem dos 19kg. A figura 2.24 ilustra o dispositivo projetado.

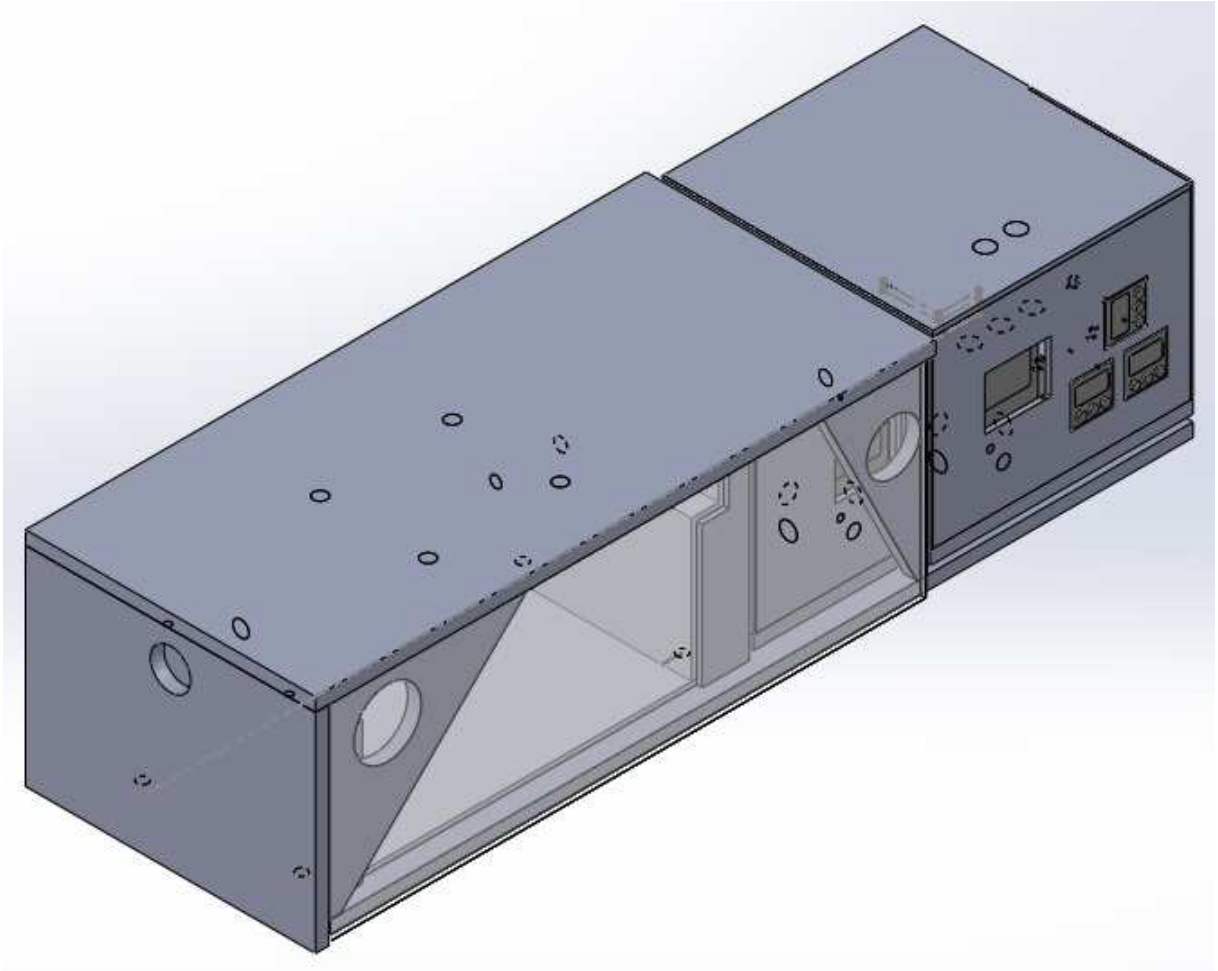


Figura 2.24 - Representação do aspeto final do dispositivo

Por fim foi desenvolvido o projeto do sistema pneumático, com o recurso a duas válvulas reguladoras de pressão e a uma servo-válvula 5/3. Isto permite duas configurações distintas para o sistema.

Dispositivo automático para operações de acabamento

3 Desenvolvimento do sistema eletrónico de comando

3.1 Introdução

Este capítulo centra-se no desenvolvimento da eletrónica de controlo do dispositivo. Começa por apresentar a arquitetura de controlo, especificando os componentes necessários. Por fim, é feita uma descrição dos protocolos de comunicação utilizados.

Pretende-se que a eletrónica de comando seja capaz de responder aos requisitos definidos, sendo que a arquitetura de controlo é projetada tendo isso em atenção.

3.2 Arquitetura de controlo

Para o desenvolvimento da arquitetura de controlo do dispositivo é necessário atender a alguns requisitos definidos para o sistema. Assim, é necessário ter presente que o dispositivo deve ser capaz de controlar a posição no eixo linear, bem como comunicar tanto com o robô como com a ferramenta. Além destes requisitos, é ainda necessário que o dispositivo controle as válvulas pneumáticas, tanto as duas reguladoras de pressão como a servo-válvula. Por questões de segurança, o dispositivo deve ainda ser capaz de detetar as posições limites do movimento da mesa, de modo a evitar colisões.

A solução de controlo adotada tem por base um microcontrolador, que se encontra no centro da arquitetura de controlo. Este microcontrolador deve ser capaz de comunicar com todos os periféricos, tais como a *interface* com o utilizador, os fins de curso, o *encoder*, os transdutores de pressão, o controlador do robô e as válvulas e ferramenta. A existência destas comunicações condiciona a escolha do microprocessador, tornando-se necessário um estudo e definição desta.

Das diversas comunicações que o microprocessador deve ser capaz, a *interface* com o utilizador e com os fins de curso não são condicionantes, visto tratarem-se de sinais digitais. A *interface* com o utilizador usa um LCD e um teclado. Quanto aos fins de curso, a única referencia a ser feita deve ser a da necessidade de interrupções no microcontrolador, por se tratar de requisitos para a segurança. Estas capacidades estão presentes na maioria dos microprocessadores.

Os transdutores de pressão por sua vez, exigem que o microprocessador seja capaz de ler sinais analógicos, visto ser um sinal deste género que é disponibilizado. Outra das capacidades a ter em conta para o microprocessador é a capacidade de leitura de um *encoder*, sendo para tal necessário que este tenha o módulo de *feedback* de movimento (*Motion Feedback Module*, MFM e *Quadrature Encoder Interface*, QEI).

Para a comunicação com o robô deve ser utilizado o protocolo de comunicação RS-232, visto este ser a forma disponível de comunicar com o robô. Isto torna necessário a inclusão de

um integrado extra no sistema, com o objetivo de implementar o protocolo de comunicação. Este integrado terá então de comunicar com o microprocessador, sendo essa comunicação feita através de um módulo USART.

Por fim, as válvulas e ferramenta necessitam de um sinal analógico para o seu comando, o que não pode ser obtido diretamente do microcontrolador. Assim, impõem-se o acréscimo de um conversor digital/analógico, sendo portanto necessário que o microcontrolador possa comunicar com este. Esta comunicação mais eficaz entre estes dispositivos é a comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*), sendo portanto necessário esta capacidade no microprocessador a escolher.

Tendo em atenção estes requisitos é possível definir uma arquitetura de comando para o sistema. Esta arquitetura centra-se num microprocessador, conforme ilustrado na figura 3.1, que comunica com os periféricos.

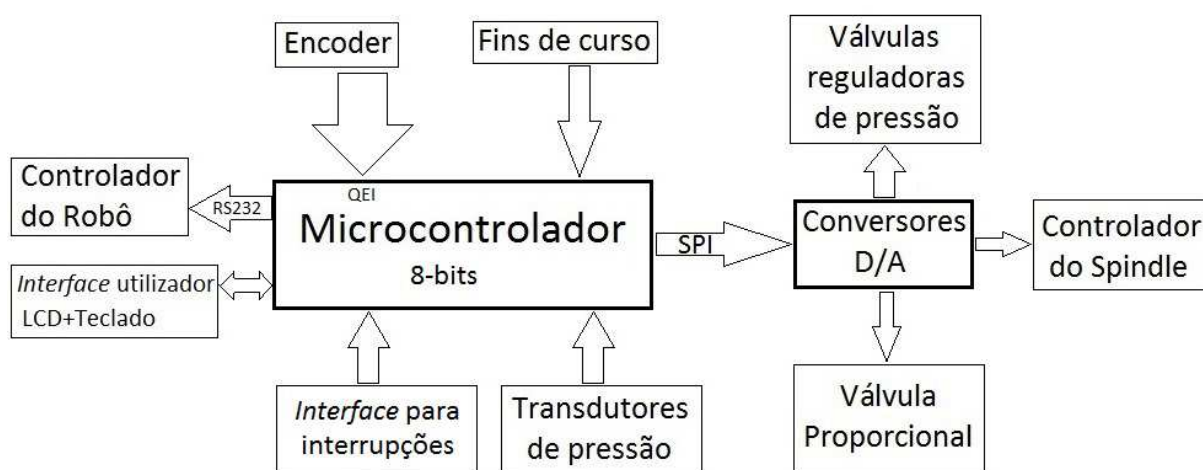


Figura 3.1 - Arquitetura de controlo do dispositivo

3.3 Hardware eletrónico

Tendo em conta a satisfação de todas as necessidades do sistema, foi escolhido um microprocessador da Microchip, designado PIC18LF4431 (figura 3.2). Este é um microcontrolador de 8-bits capaz de responder a todas as exigências do sistema, isto é, contém um módulo de *feedback* de movimento (MFM), conversor de alta velocidade analógico/digital de 10-bits e módulo USART (compatível com RS-485, RS-232 e LIN/J2602). Além destas características é de destacar neste microprocessador o módulo de controlo de potência de 14-bits (*14-bit Power Control PWM Module*) e um bloco oscilador interno capaz de frequências entre 31KHz até 8MHz.

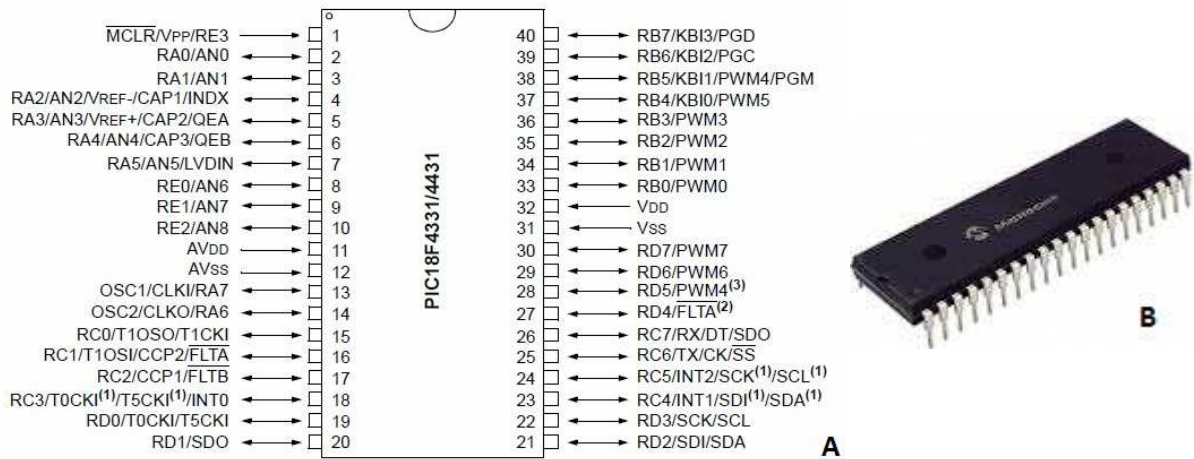


Figura 3.2 - Microprocessador PIC18LF4431, descrição dos pinos (A) e fotografia (B) [15]

Outros dos componentes utilizados são os conversores de sinal digital/analógico. Estes conversores são necessários pois o microprocessador apenas consegue transmitir sinais digitais. Assim, de modo a ser possível controlar tanto as válvulas como a velocidade da ferramenta, é necessário este conversor. Como referido, é necessário dispor de quatro sinais analógicos (para as válvulas reguladoras de pressão, a servo-válvula 5/3 e a ferramenta). Para corresponder a esta necessidade são utilizados dois conversores da marca Microchip designados MCP 4422 (figura 3.3). Como características principais estes conversores possuem dois conversores D/A de 12 *bits*, comunicação SPI até 20MHz e 2.048V (*volts*) de tensão de referência interna.

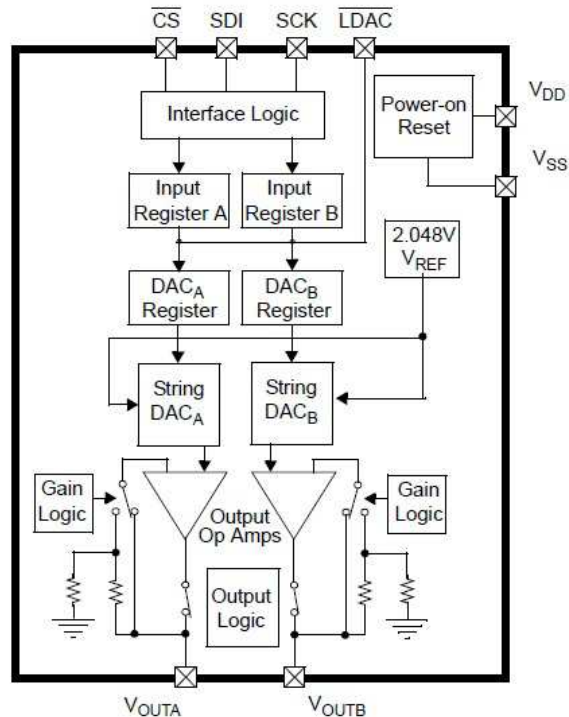


Figura 3.3 - Diagrama de blocos de um integrado MCP 4422

Para a comunicação com o controlador do robô via Porta RS-232, é necessário a utilização do integrado MAX232 (figura 3.4), da empresa Maxim. Este componente vai permitir a conversão dos *bits* enviados pelo microprocessador, através do módulo USART, em novos níveis de tensão necessários para a comunicação. Este tipo de comunicação é bidirecional, ainda que para a aplicação desejada apenas vá ser utilizado o setor de envio de informação.

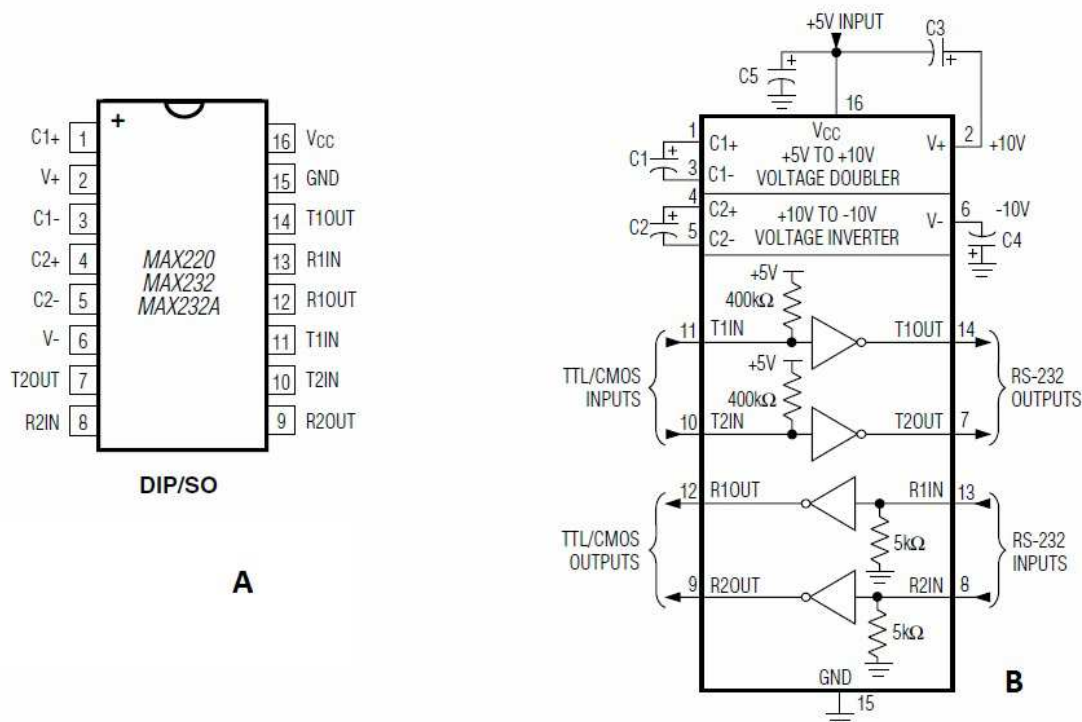


Figura 3.4 – Descrição de pinos (A) e diagrama de blocos (B) de um integrado MAX232

Como já foi referido, para a *interface* com o utilizador é utilizado um LCD e um teclado. O LCD (figura 3.5A) é de 2 linhas e 16 colunas, permitindo o envio de informação para o utilizador. Por sua vez, o teclado tem 16 teclas (figura 3.5B), ou seja, números do 0 ao 9, asterisco, cardinal e as letras de A a D, e está destinado a inserção de informação por parte do utilizador.

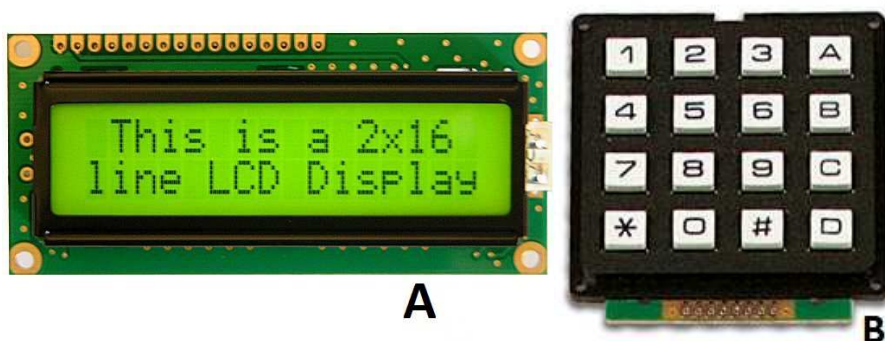


Figura 3.5 - LCD 2x16 (A) [16] e teclado (B) [17]

Por fim, o ultimo elemento do *hardware* necessário ao funcionamento da eletrónica de controlo é o integrado de alimentação. A utilização deste advém do facto de ser necessário garantir uma tensão estável, de 5V, para o funcionamento correto da eletrónica. Isto consegue-se utilizando um integrado da Maxim, designado MAX667 (figura 3.6).

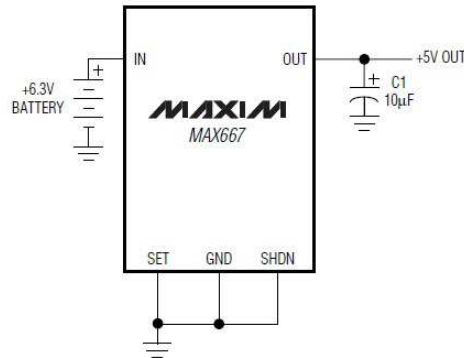


Figura 3.6 - Descrição de pinos do integrado MAX667

3.4 Implementação do sistema eletrónico de comando

O sistema de controlo descrito é implementado numa *breadboard*, de modo a ser efetuado a programação e os testes necessários. Nesta implementação todos os componentes foram ligados de forma a respeitar as suas instruções de montagem e interligação. A figura 3.7 mostra essa montagem.

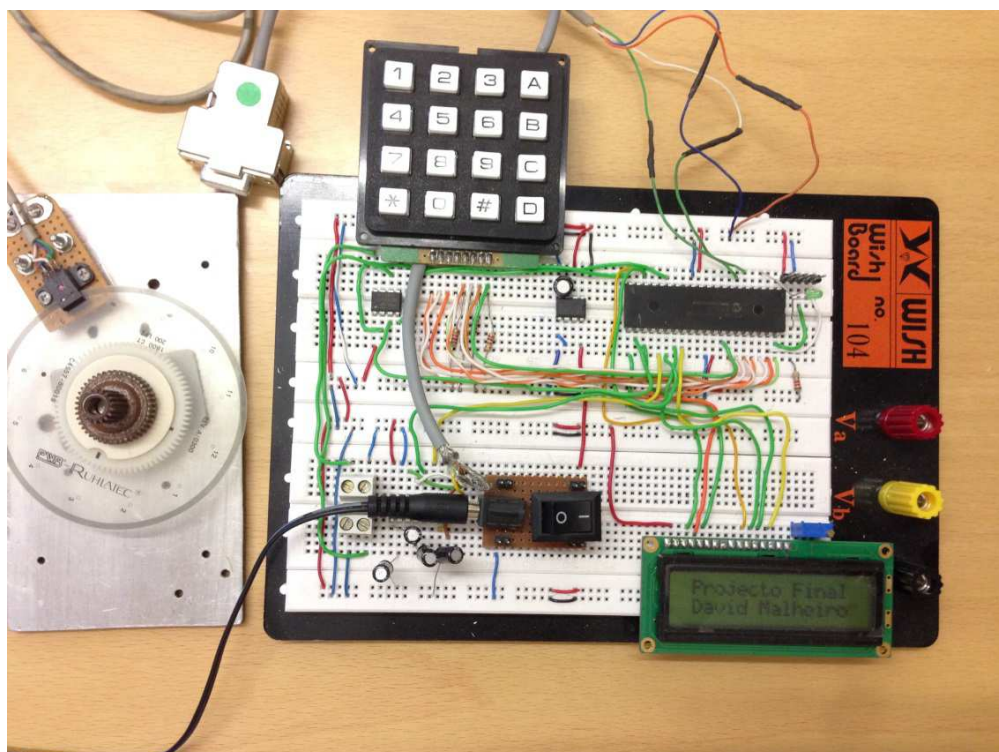


Figura 3.7 - Implementação em *breadboard* do sistema de controlo

3.5 Protocolos de comunicação

Na arquitetura de controlo foram referidas várias comunicações, estando presente neste sistema o protocolo SPI e o protocolo de comunicação RS-232.

A comunicação SPI é uma comunicação utilizada entre o microprocessador e os conversores. Este tipo de comunicação permite ao microprocessador transferir informação para um ou mais componentes do sistema, utilizando para tal três linhas comuns entre todos, e uma extra para cada componente. Assim, o dispositivo que comanda a comunicação é chamado de *Master*, e é este elemento que define quando mandar ou receber informação, e para e de quem. Os outros componentes são chamados de *Slaves*, e só lhes é possível enviar ou receber informação quando o *Master* permite. A linha individual de cada um dos *Slaves* define quando estes podem ou não receber ou enviar informação. A informação é sempre colocada nas linhas comuns, em forma de *bits*. Como podemos ver na figura 3.8, a comunicação é feita através de quatro linhas, sendo as três comuns a SCLK, DIN e DOUT, quanto a específica de cada componente chamada CSx. Ou seja, a linha SCLK garante o fornecimento de tensão aos *Slaves*, bem como o rácio de transmissão de informação, a DIN é responsável pelo envio de informação do *Master* para os *Slaves*, a DOUT pela mesma função mas em sentido oposto. Por sua vez, a linha CSx apenas permite ou não ao *Slave* comunicar.

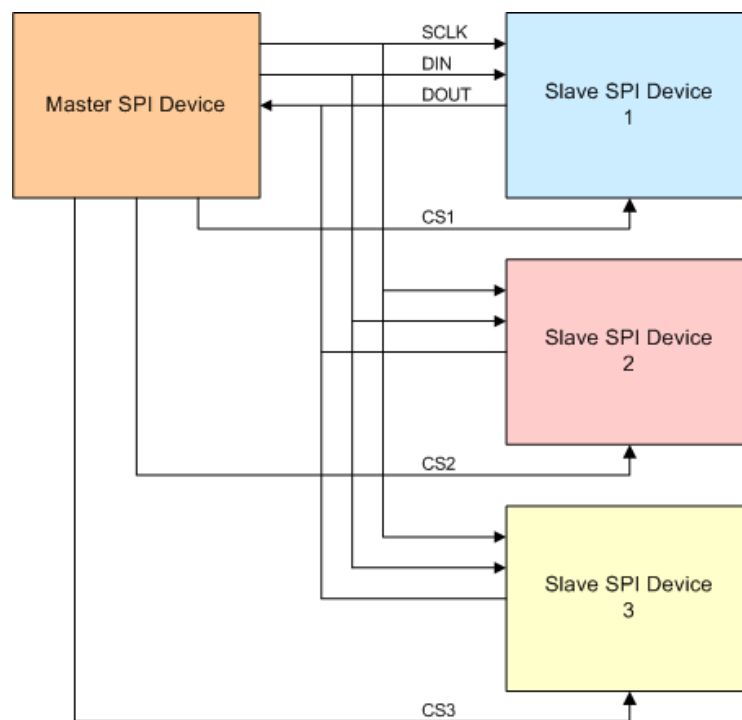


Figura 3.8 - Comunicação SPI [18]

O outro protocolo a ter em atenção é o RS-232, utilizada nesta arquitetura para a comunicação com o robô industrial. Este é um protocolo de comunicação série, o que significa que utiliza apenas uma linha para o envio de informação, chamado o canal de comunicação. Ou seja, neste modo de comunicação o rácio de envio de informação tem de ser definido previamente, de modo a todos os intervenientes conseguirem interpretar a

informação. Posteriormente, a informação é transportada em forma de *bytes*, constituídos por 8 *bits* (figura 3.9) Este tipo de protocolo de comunicação é bastante utilizado em ambiente industrial, devido a ser uma forma de comunicar de baixo custo e com imunidade ao ruído elevada.

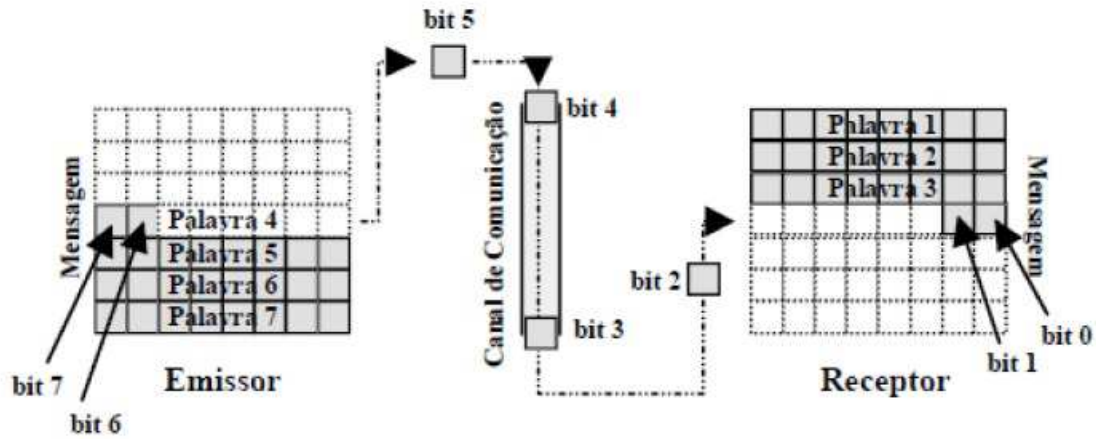


Figura 3.9 - Comunicação série [19]

3.6 Conclusão

Este capítulo teve como finalidade o desenvolvimento da arquitetura de controlo do dispositivo, respeitando os requisitos do sistema.

Para tal foram estudadas as condicionantes do sistema e quais as necessidades especiais do mesmo. Com isto foi possível desenvolver uma arquitetura de comando, na qual foram tidos em conta todos os componentes do sistema e as comunicações utilizadas. Por fim foi feita uma descrição detalhada do *hardware* eletrónico utilizado no controlo, bem como dos protocolos de comunicação utilizados.

Dispositivo automático para operações de acabamento

4 Desenvolvimento do *Software* de controlo

4.1 Introdução

Este quarto capítulo é dedicado à programação do dispositivo auxiliar para operações de acabamento. Aqui é descrito o *software* desenvolvido para o dispositivo, bem como o objetivo de cada parte do mesmo.

Para a programação do microcontrolador foi utilizado o *software* de programação MicroC, bem como o programador PICKit 3 (figura 4.1), associado ao seu *software*.



Figura 4.1 - PICKit 3 [20]

4.2 Programação

A programação de um microcontrolador é uma construção modular, ou seja, é feita através de pequenos módulos individuais (funções), que juntos fazem um programa. Outra consideração a ter em atenção é o modo como um programa deve trabalhar no microprocessador. Para que funciona corretamente, o programa deve conter um circuito fechado, que na linguagem de programação é chamado de *loop*, e que permite que o programa corra constantemente. Este circuito é portanto o centro do programa. Ainda que a parte mais importante do programa seja o *loop* principal, é necessário efetuar algumas configurações antes dessa fase.

Em primeiro lugar, é necessário definir as configurações do microprocessador. Para tal foi criada uma função de “configuração”, que deve ser executada no arranque do microprocessador. Esta função é responsável por definir o oscilador do microprocessador, a configuração de cada pino deste (se são entradas ou saídas do microcontrolador), e o estado de cada módulo. Para o dispositivo a desenvolver é necessário a ativação dos módulos de leitura de sinais analógicos, do módulo de recolha de dados (de modo a recolher dados do *encoder*), o modulo USART e o da comunicação SPI. É também nesta função que é definida quais os pinos que vão estar conectados ao LCD e ao teclado, visto tratarem-se de

componentes específicos. A figura 4.2 mostra um esquema do que acontece na função de configuração. De notar é o facto de esta função não se apresentar em forma de circuito fechado, visto só ser necessária a sua ativação no arranque do microprocessador.

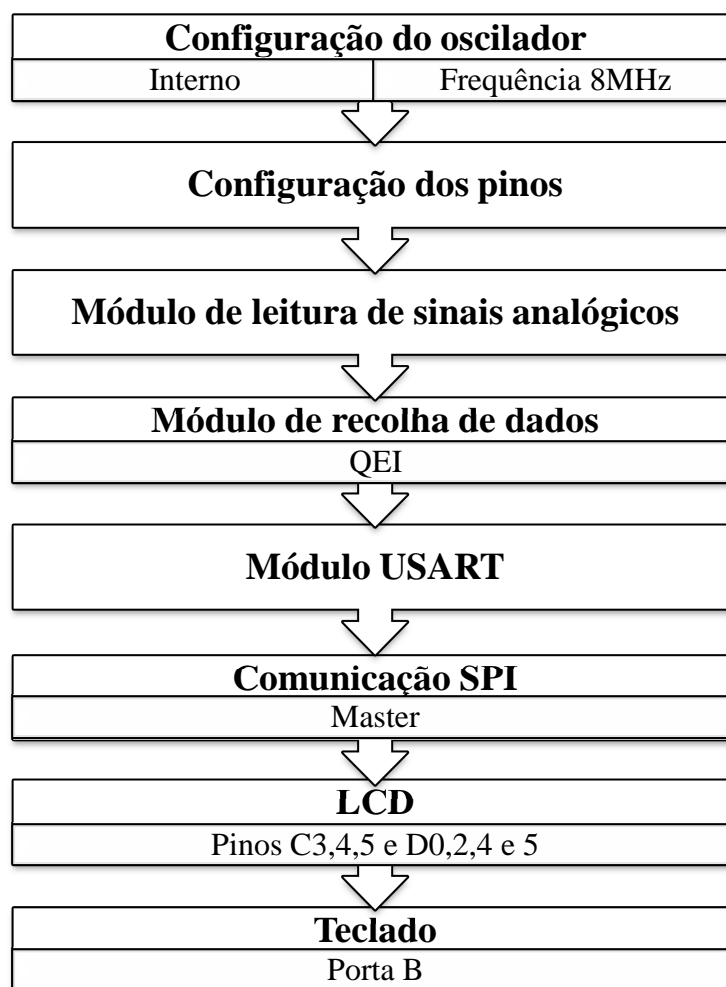


Figura 4.2 - Esquema de funcionamento da função de configuração

Após a configuração do microprocessador, é necessário configurar a comunicação SPI. Esta comunicação foi ativada na função “configuração”, mas necessita de ser configurada. Para tal é criada uma função, que tal como a anterior não é circular, visto só ser chamada quando é necessário enviar informação. No caso do dispositivo a desenvolver, e devido ao facto de este conter dois conversores, é necessário a criação de duas funções, uma para cada conversor. Esta função começa por iniciar a comunicação com o respetivo conversor, através da linha CS, de seguida envia a informação pretendida, e termina a comunicação. A informação é enviada através de um *Buffer*, na forma de um *byte*. Como o conversor digital/analógico converte 12 *bits*, e um *byte* é composto por 8, é necessário enviar dois *bytes*. Assim, o conversor começa por carregar um *byte* no *buffer*, sendo que este corresponde aos quatro dígitos mais significativo a enviar (só são tidos em conta quatro dos oito *bits* que compõem um *byte*, sendo neste caso os menos significativos). A este *byte* é dado o nome de “valor alto”. Em seguida é carregado o resto da informação a enviar no *buffer*, sobre a forma de outro *byte*, desta vez totalmente preenchido. A este é dado o nome de “valor baixo”. É

ainda importante, para garantir o bom funcionamento do sistema, que depois de cada envio de *byte* se introduza no sistema um atraso (5 milissegundos é suficiente). A figura 4.3 representa esquematicamente este processo.

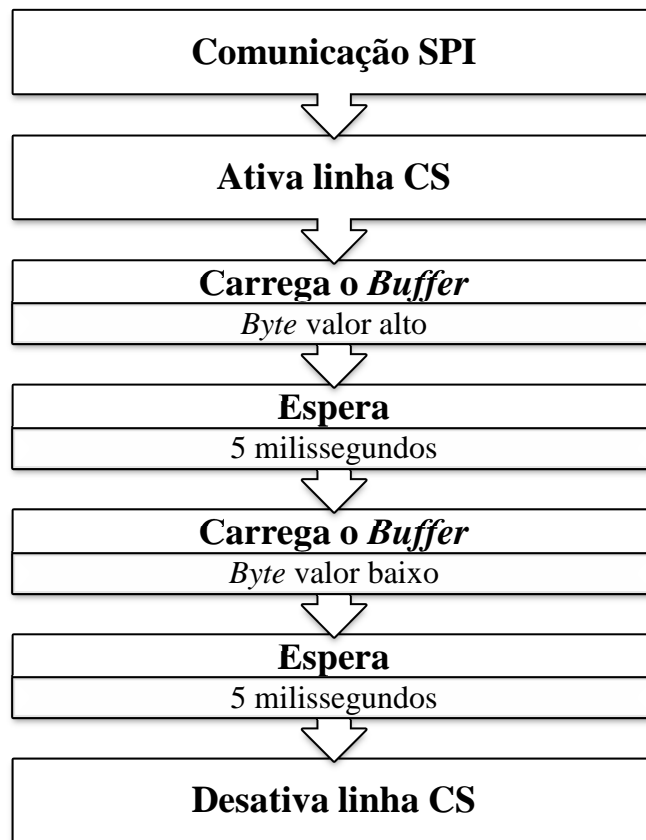


Figura 4.3 - Esquema de funcionamento da função de comunicação SPI

Após a criação destas duas funções, é possível desenvolver a função principal do programa, isto é, aquela na qual se encontra o *loop* principal. Esta função é composta na sua maioria pelo *loop*, ainda que existam outras instruções. Assim, a função principal começa por executar a função de configuração, seguindo-se o arranque do LCD, passando depois para o ciclo fechado. De referir que o arranque do LCD é composto por diversos passos. Este começa por limpar o ecrã. De seguida, e durante 3 segundos, é mostrada uma imagem de apresentação (figura 4.4 A). Por fim, o ecrã volta a ser limpo e passa para a sua configuração de trabalho, na qual apresenta na primeira linha as entradas do teclado e na segunda linha o valor lido no *encoder* (figura 4.4 B).

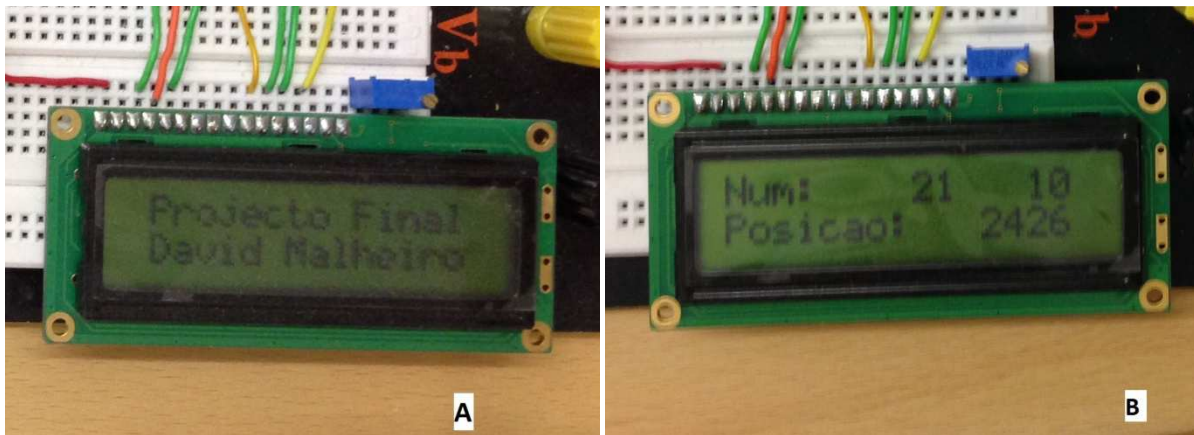


Figura 4.4 - Mensagem inicial (A) e configuração de trabalho (B) do LCD

Após ultrapassar estas fases o programa entra no seu ciclo principal. Este ciclo começa por fazer uma leitura ao valor proveniente do *encoder* e envio para o LCD. Em seguida utiliza esse mesmo valor de posição e atualiza as saídas dos conversores, sendo que para tal faz uso das funções de comunicação SPI. A estratégia utilizada para a variação dos valores dos conversores é por patamares, ou seja, até um determinado valor lido no *encoder*, a tensão disponível é uma, sendo que ultrapassado esse valor de posição, a tensão à saída dos conversores aumenta (figura 4.5).

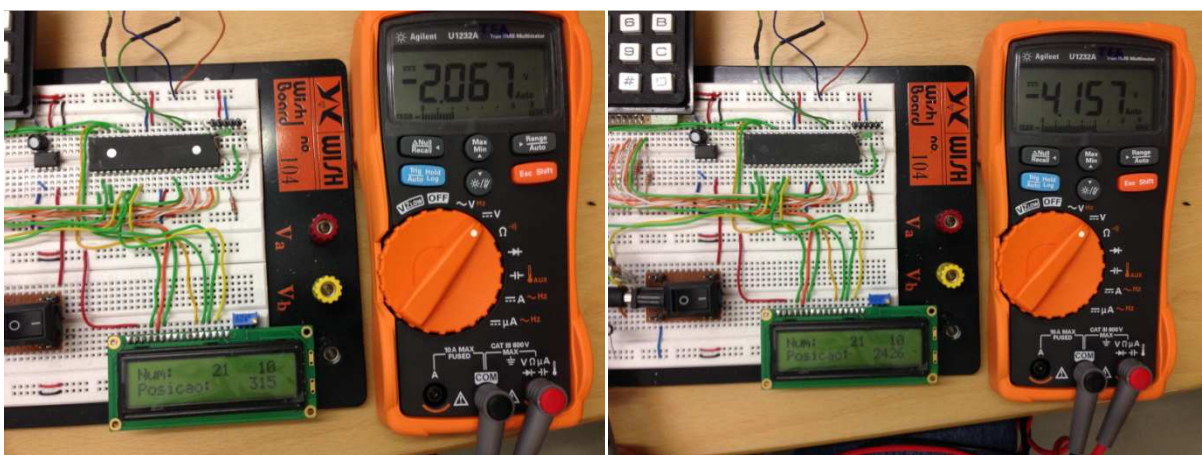


Figura 4.5 - Variação da tensão à saída dos conversores D/A, com a variação do *encoder*

Com os valores de saída dos conversores atualizados, o programa passa a tratar e enviar os valores de posição para o robô. Do mesmo modo que acontece nas funções de comunicação SPI, para o envio de informação para o robô também é necessário a manipulação de *bytes*. Assim, vão ser enviados dois *bytes* sendo o mais significativo chamado *byte* mais, e o menos significativo chamado *byte* menos. O tratamento dos *bytes* a enviar é feito de modo a poder ser utilizada a programação já existente no robô, não sendo assim necessário mais uma atualização ao robô. Para o envio desta informação é utilizada a módulo USART, já referido anteriormente.

Em seguida, o sistema registra entradas no teclado. Ou seja, caso alguma tecla do teclado seja pressionada, o sistema reconhece a tecla, converte esse valor de entrada no valor do código ASCII correspondente, e escreve esse valor no LCD. Esta conversão tem de ser efetuada por meio de uma função, que converte o valor que cada tecla fornece ao sistema, na sua correspondente do código assim referido. Sem esta função o sistema não é capaz de fazer corresponder cada tecla com o seu valor correto.

A figura 4.6 permite compreender o funcionamento do ciclo fechado. É importante referir que o microprocessador funciona a 8MHz.

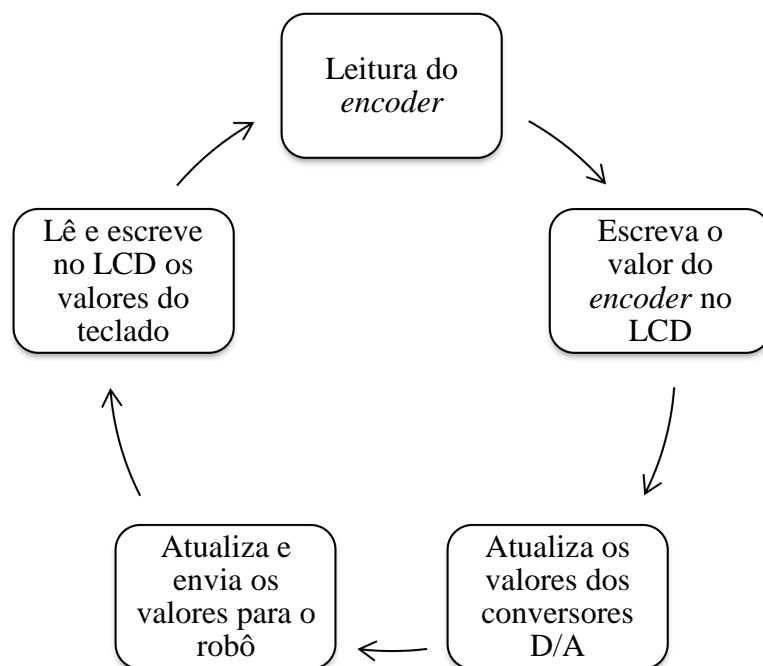


Figura 4.6 - Representação esquemática do ciclo fechado

No Anexo B é apresentado parte do código de programação do microcontrolador utilizado na implementação dos testes efetuados.

4.3 Conclusão

Neste capítulo foi desenvolvido o *software* do dispositivo. Este desenvolvimento centrou-se na comunicação com os periféricos, tornando assim possível algumas funções de monitorização e comando do sistema.

Assim é possível visualizar os valores de posição obtidos através do *encoder* o LCD, bem como o envio dessa informação através da porta serie para o controlador do robô industrial. Estes valores de posição são ainda utilizados para regular tensões de saída, a ser utilizadas para as válvulas e para o controlo da velocidade da ferramenta. É ainda possível a inserção de dados, através do teclado.

Dispositivo automático para operações de acabamento

Ainda que não esteja no âmbito deste projeto a implementação das interrupções, é importante referir que todo o desenvolvimento tem em conta a sua futura introdução. Estas interrupções serão todos os sistemas de segurança associados ao mecanismo, tais como botoneiras de segurança, fins de curso de segurança, falhas de segurança provenientes tanto do robô como da ferramenta e todas as outras situações que forem consideradas necessárias.

5 Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Este projeto pretende dar continuidade ao desenvolvimento de um dispositivo auxiliar automático com controlo de força para operações de acabamento, existente no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Este dispositivo foi desenvolvido com a capacidade de regular a força de contacto ao longo de um grau de liberdade linear, bem como com capacidade de seguir uma trajetória ao longo desse mesmo grau de liberdade.

Foi efetuado o projeto mecânico do dispositivo de controlo de força, tendo sido definida uma solução de um dispositivo fechado, autoportante e com eletrónica integrada. Esta eletrónica foi isolada de vibrações causadas pelas operações a realizar. O projeto mecânico prevê ainda a montagem do dispositivo em uma mesa auxiliar, de modo a trabalhar em paralelo tanto com um robô industrial como com um operador.

A capacidade de força do dispositivo é obtida através de um cilindro pneumático, sendo que o seu controlo pode ser efetuado tanto através de duas válvulas reguladoras de pressão, como através de uma servo-válvula 5/3. A utilização de duas formas de controlo distintas visa a otimização do dispositivo, sendo uma das configurações mais adequada para o controlo da força de contacto, e a outra para o seguimento da trajetória. O controlo do sistema através de duas válvulas reguladoras de pressão permite ainda ao utilizador controlar a rigidez do sistema, alterando para tal a gama de pressões de funcionamento.

O projeto tem ainda como objetivo o controlo do dispositivo baseado numa arquitetura centrada em um microprocessador, capaz de, aliado a um circuito eletrónico, comandar ambas as configurações pneumáticas, bem como comunicar com o controlador da ferramenta e do robô. A capacidade de recolha de informação sobre a posição da mesa móvel do dispositivo foi também um fator a ter em conta no desenvolvimento do *software* de controlo.

O projeto de desenvolvimento do dispositivo revelou-se um grande desafio pela diversidade de áreas que englobou, tais como estrutura mecânica, sistema pneumático e desenvolvimento de algum *software* de controlo.

5.2 Sugestão de trabalhos futuros

Visto que atualmente o dispositivo se encontra apenas em projeto, o próximo passo no seu desenvolvimento passa pela fabricação e montagem do mesmo. Com isto deverá também ser melhorada a solução de controlo, de modo a disponibilizar novas capacidades e estratégias de controlo.

As potencialidades do sistema permitem a programação de novos modos de funcionamento, como a conjugação das várias capacidades do dispositivo de modo a obter um melhor resultado de acabamento. A otimização do modo de funcionamento com vista a um melhor acabamento deve também ser alvo de um estudo.

Outra das possibilidades de evolução do dispositivo passa pela integração de uma *interface* mais amigável para o utilizador, com a substituição do teclado e LCD por uma HMI, com a possibilidade de maior flexibilidade do sistema.

O estudo de como a alteração dos vários parâmetros disponíveis no sistema desenvolvido influencia as características do processo acabamento pode também ser um projeto a desenvolver futuramente, com o objetivo de melhor perceber como realizar as operações de acabamento automatizadas.

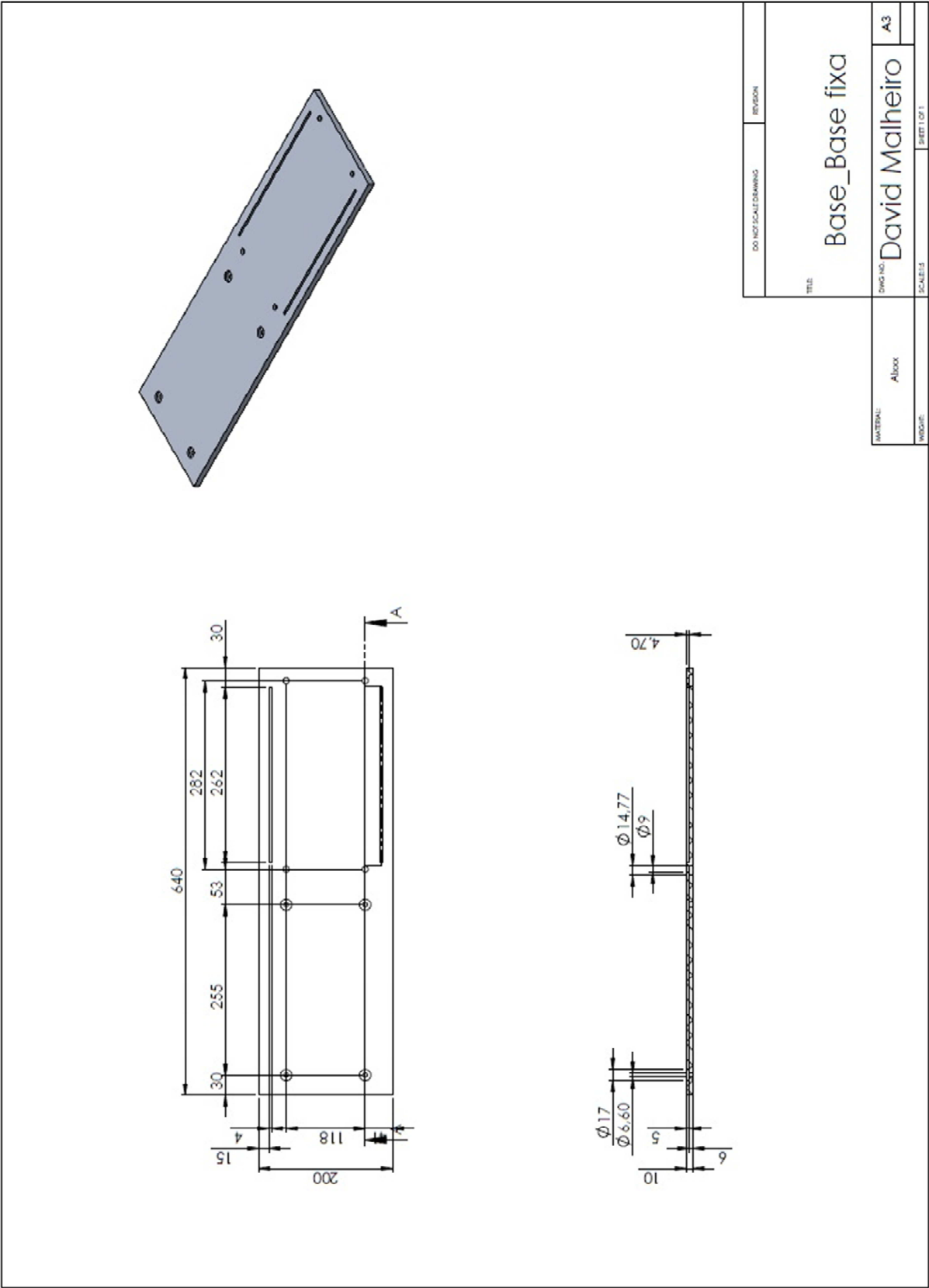
6 Referencias

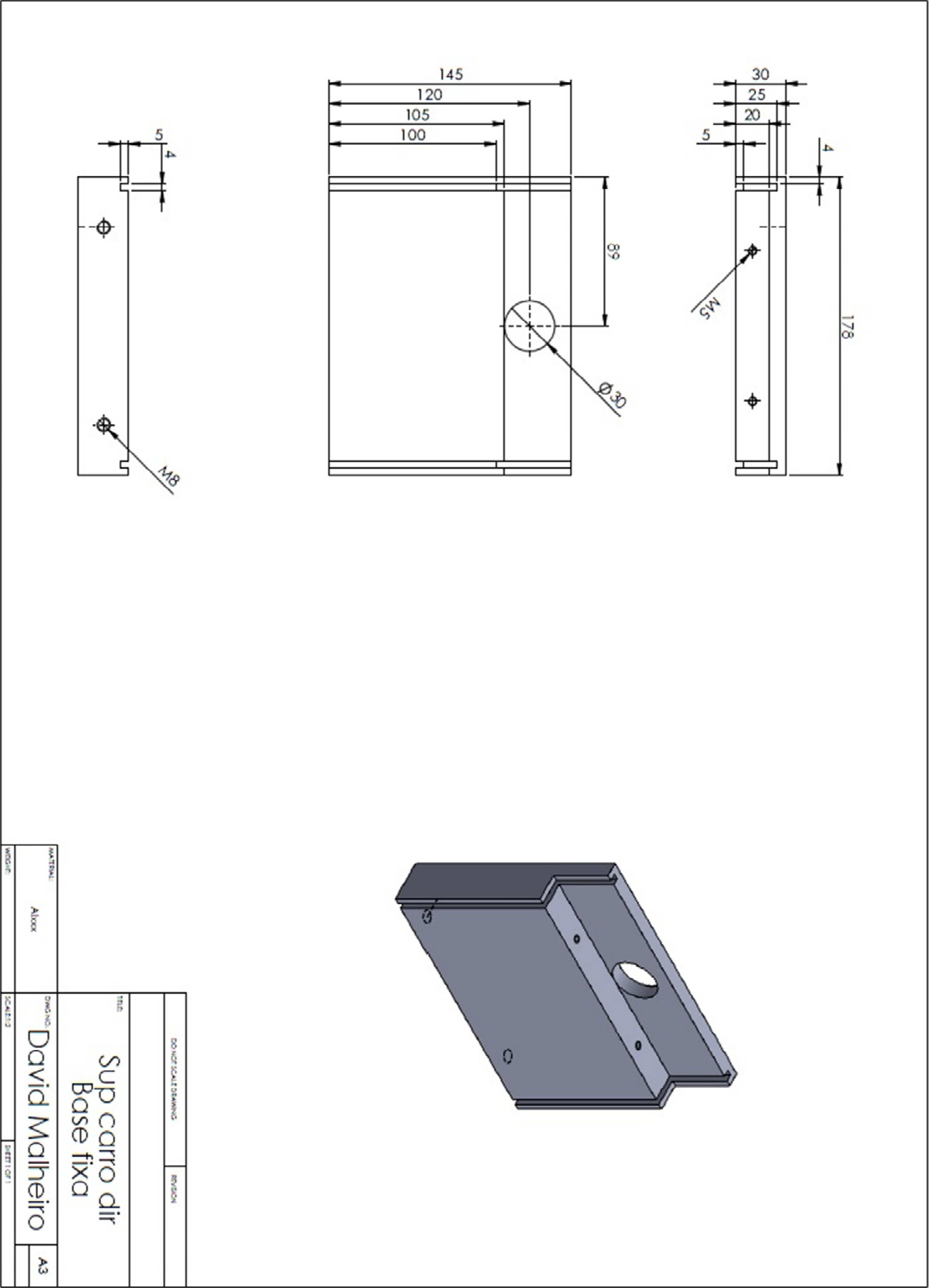
- [1] Pagilla, P., & Yu, B. (2001, Março). Robotic Surface Finishing Processes: Modeling, Control and Experiments. *Journal of dynamic systems, measurement and control* , pp. 93-102.
- [2] http://www.robotyka.com/zdjecie.php?adres=zdjecia/wiadomosci/929_4.jpg. Acesso em 15/06/2014.
- [3] Miekstyn, P. (2002). *Robot Finishing Applications*. Acme Manufacturing Company.
- [4] <http://www.wessmaquinas.com.br/torno-cnc.php>. Acesso em 15/06/2014.
- [5] http://transporteseguro.files.wordpress.com/2012/05/producao_autopec3a7as.jpg. Acesso em 15/06/2014.
- [6] ATI Industrial Automation.2014. www.ati-ia.com [Online].
- [7] PushCorp.2013. www.pushcorp.com [Online].
- [8] Viana, Diogo Gigante. *Desenvolvimento de uma Solução robótica para Operações de Acabamento de Solas de Sapatos*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na opção de Automação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2010.
- [9] <http://www.engprod.ufjf.br/processos/USINAGEM/FRESAMENTO/image007.jpg>. Acesso em 08/01/2010.
- [10] <http://content2.smcetech.com/image/large/3097.jpg>. Acesso em 21/06/2014.
- [11] <http://content2.smcetech.com/image/large/2208.jpg>. Acesso em 21/06/2014.
- [12] <http://content2.smcetech.com/image/large/4017.jpg>. Acesso em 21/06/2014.
- [13] <http://content2.smcetech.com/image/large/ISE40A.jpg>. Acesso em 21/06/2014.
- [14] <http://dalse.ru/sh/3/378c.jpg>. Acesso em 21/06/2014.
- [15] http://media.digikey.com/photos/Microchip%20Tech%20Photos/150-40-DIP_sml.jpg. Acesso em 21/06/2014.
- [16] <https://ferpinheiro.files.wordpress.com/2012/01/lcd162b-yhy.jpg>. Acesso em 28/06/2014.
- [17] http://www.mon-club-elec.fr/mes_images/communs/clavier4x4.gif. Acesso em 28/06/2014.
- [18] https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRh7R6g3QCADVp-kSnn76_i9sjQsGsw5F3jnSnJMeS3wbU-wBsv. Acesso em 28/06/2014.
- [19] Acetato de apoio às aulas práticas da disciplina de Computação Industrial de 2001 da FEUP.
- [20] http://static4.tme.eu/katalog_pics/1/d/a/1da4de35fd4f9c14952815eca265941d/pickit-3-icd.jpg. Acesso em 28/06/2014.

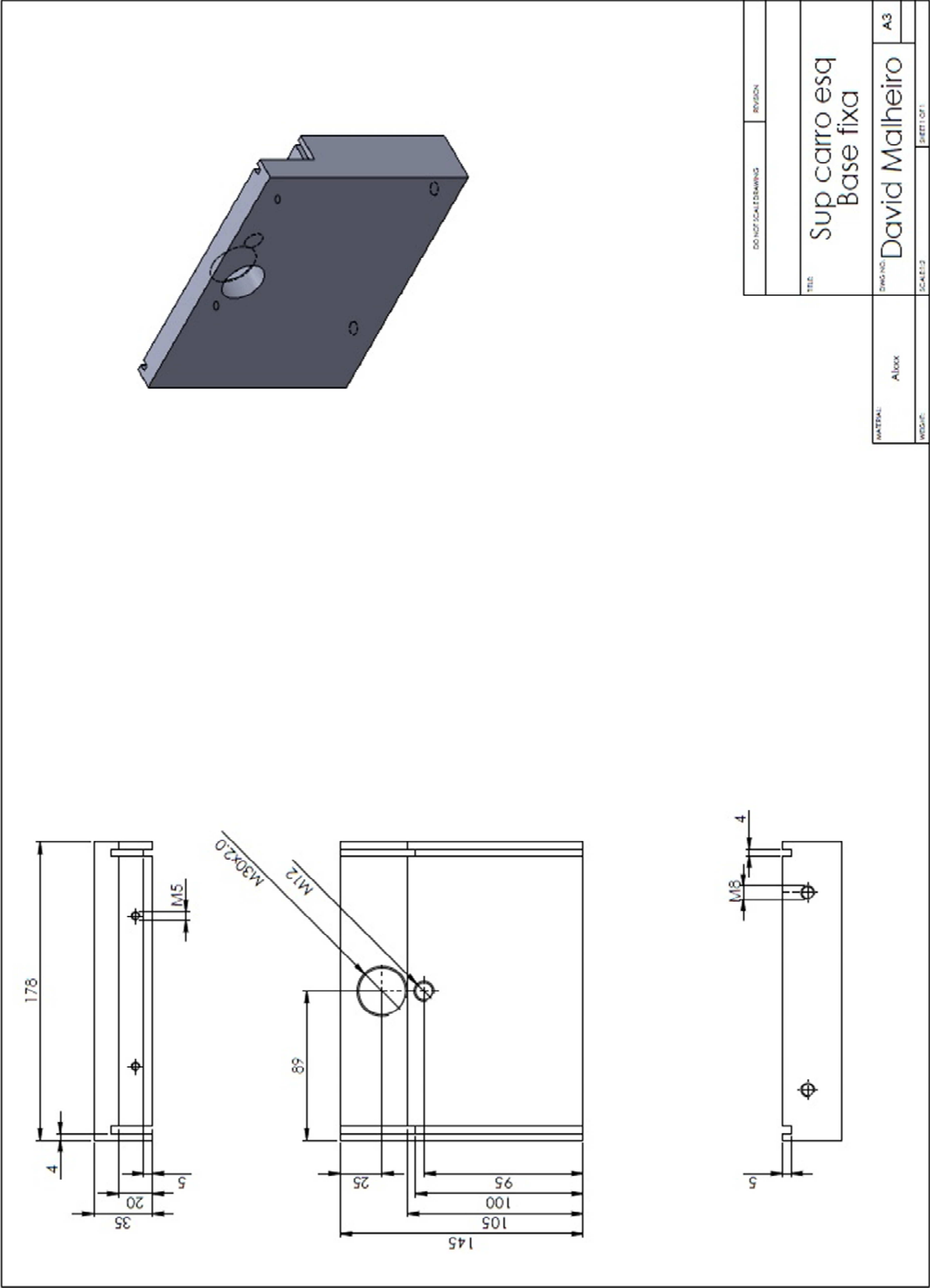
Anexos

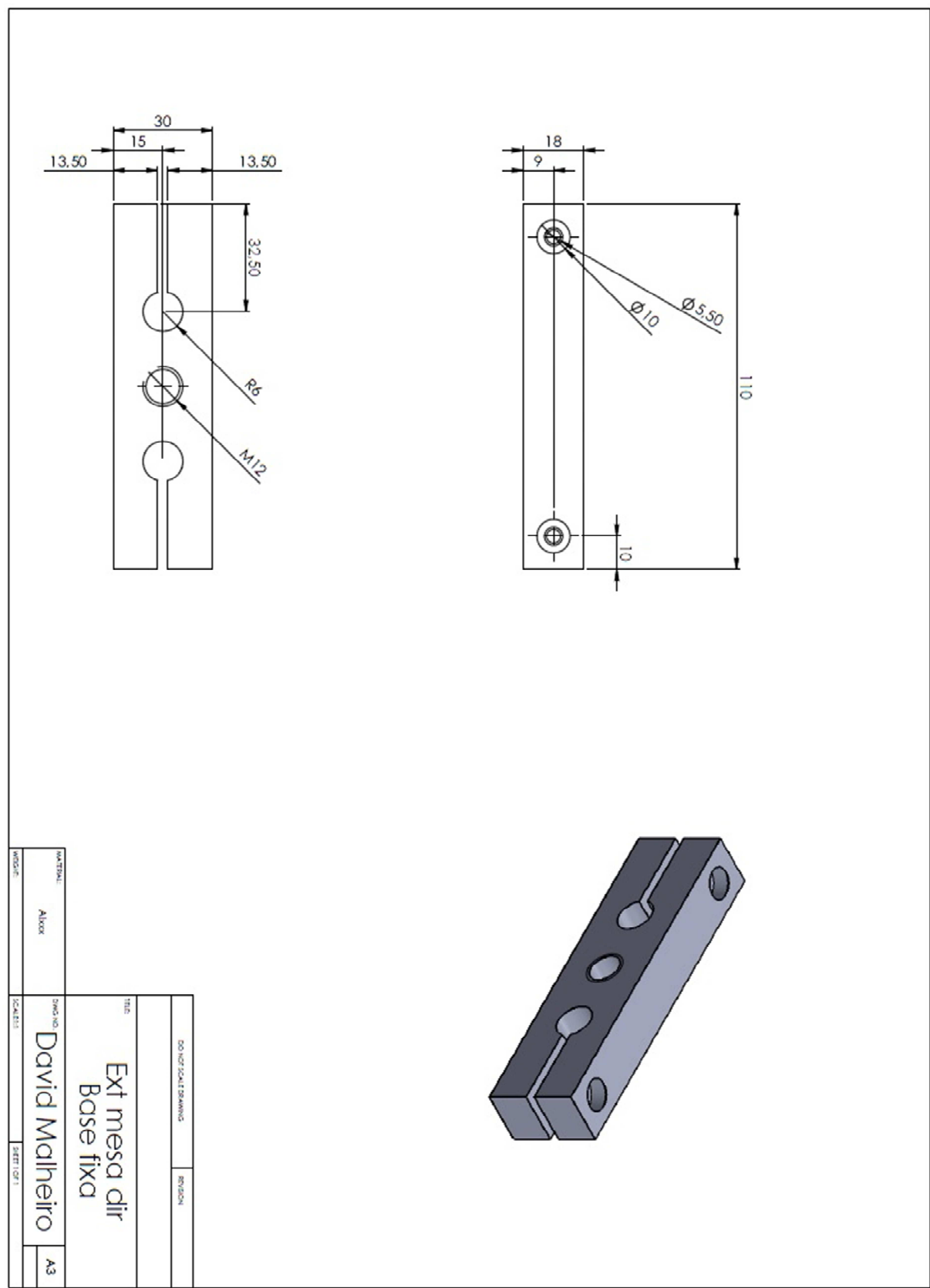
Dispositivo automático para operações de acabamento

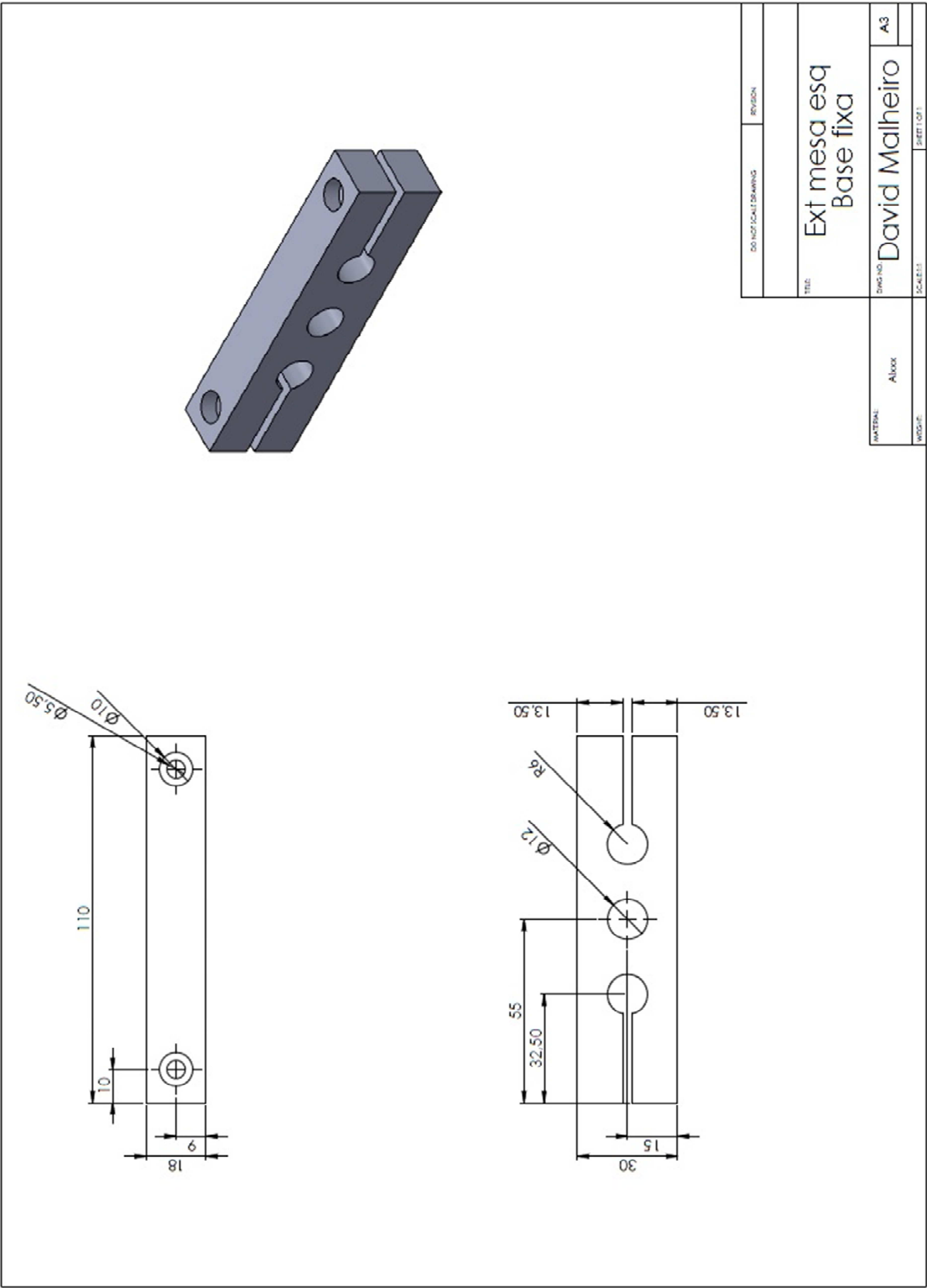
Anexo A – Desenhos de definição das peças constituintes do dispositivo

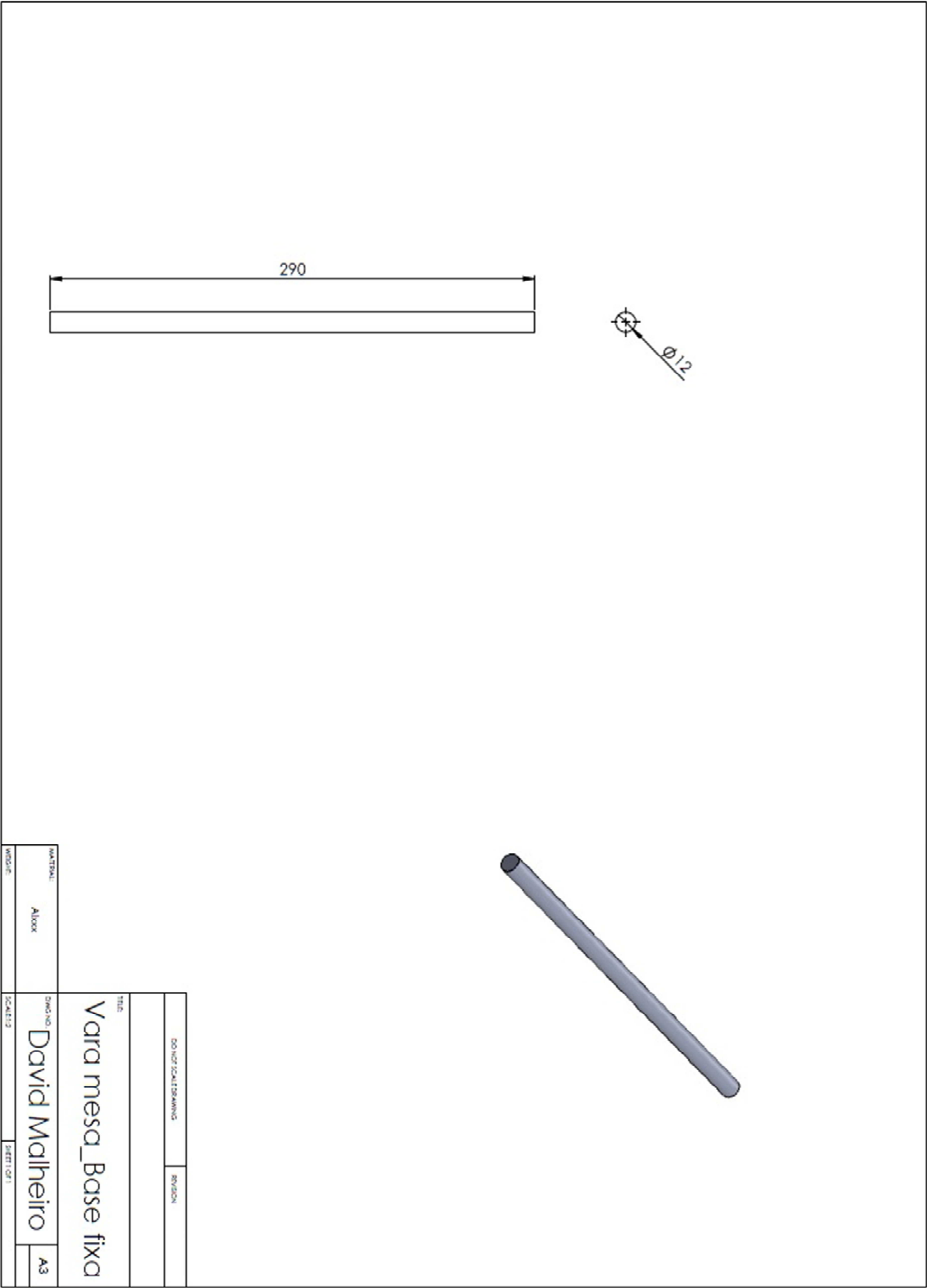


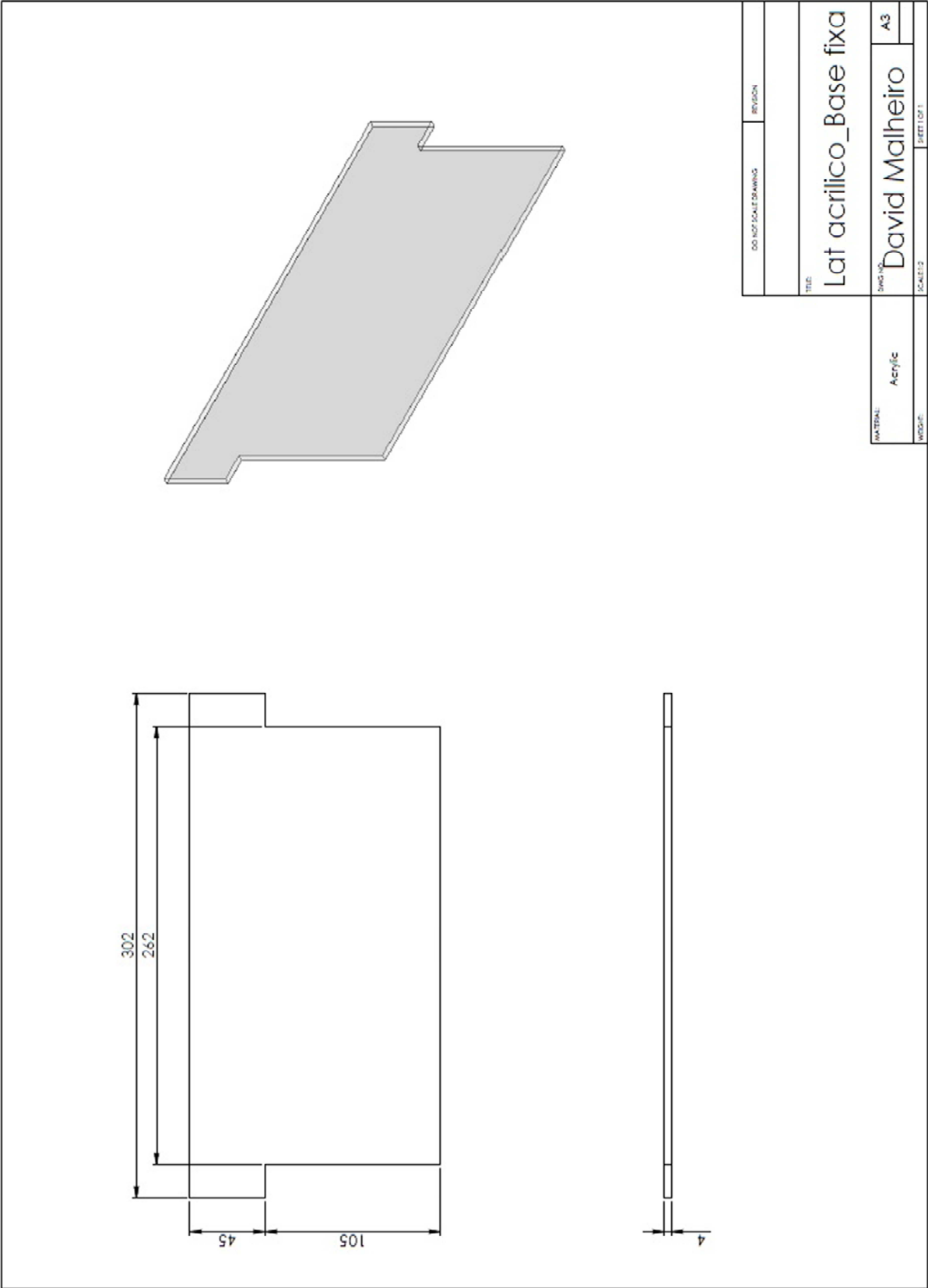


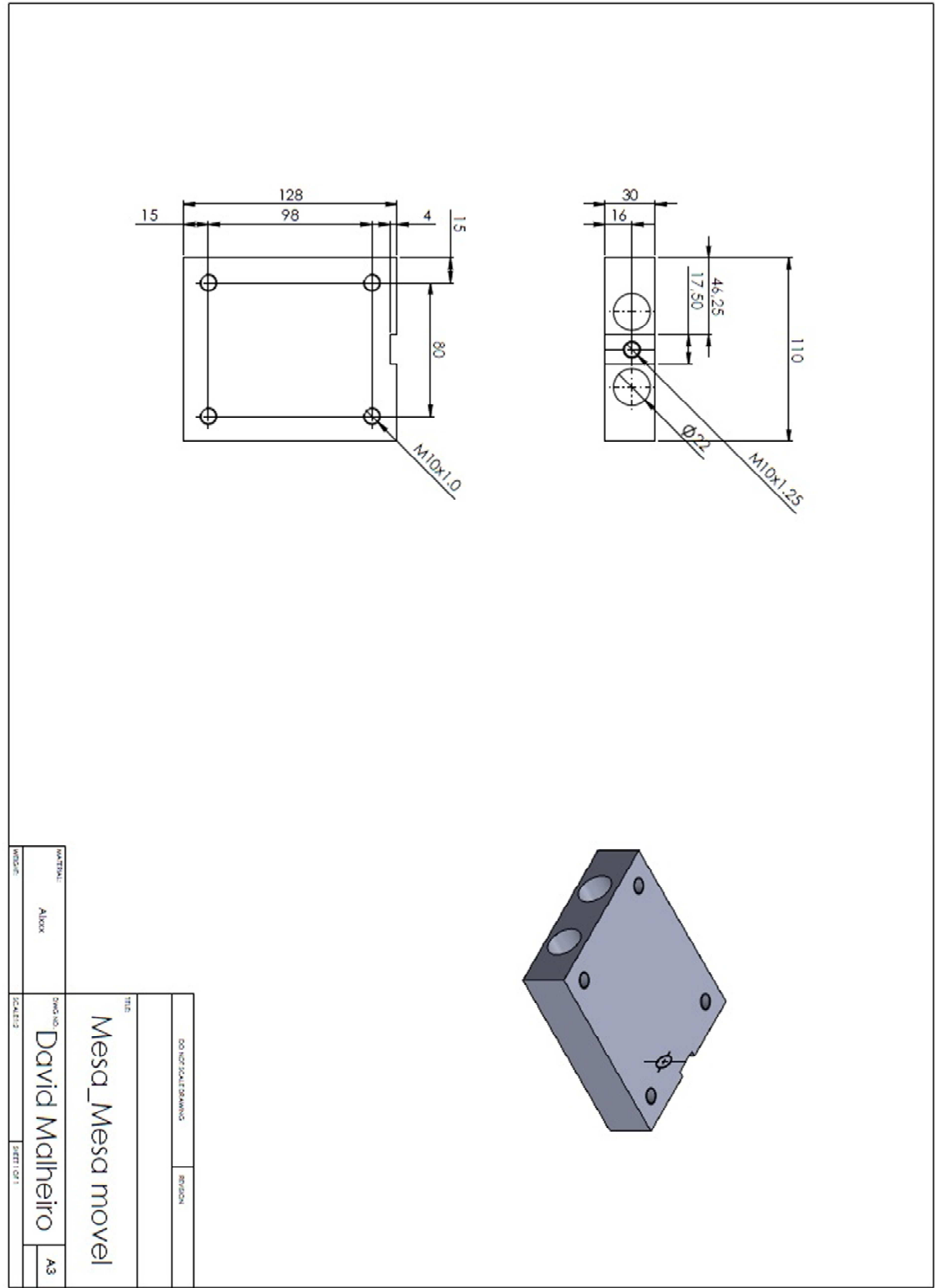


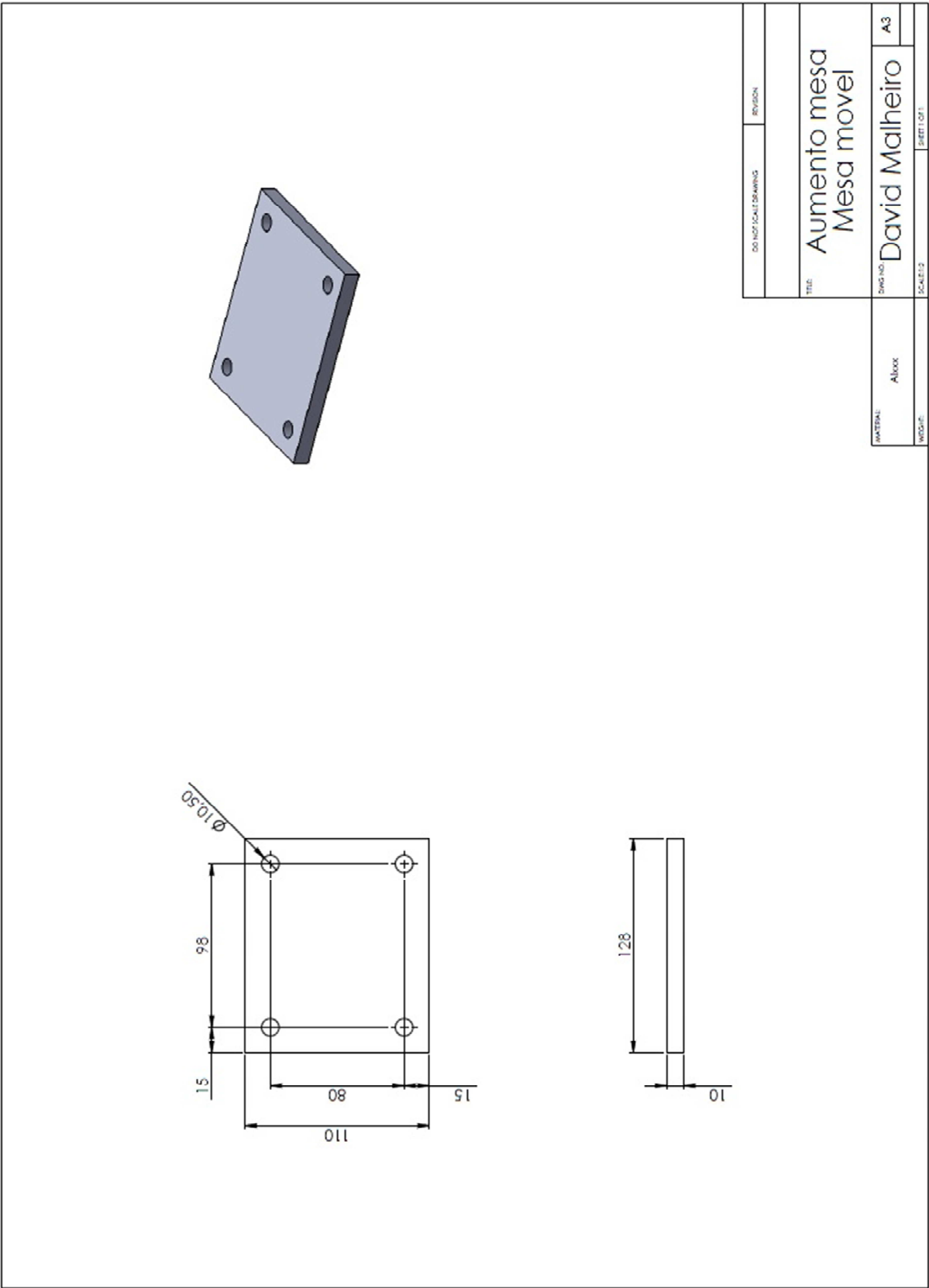




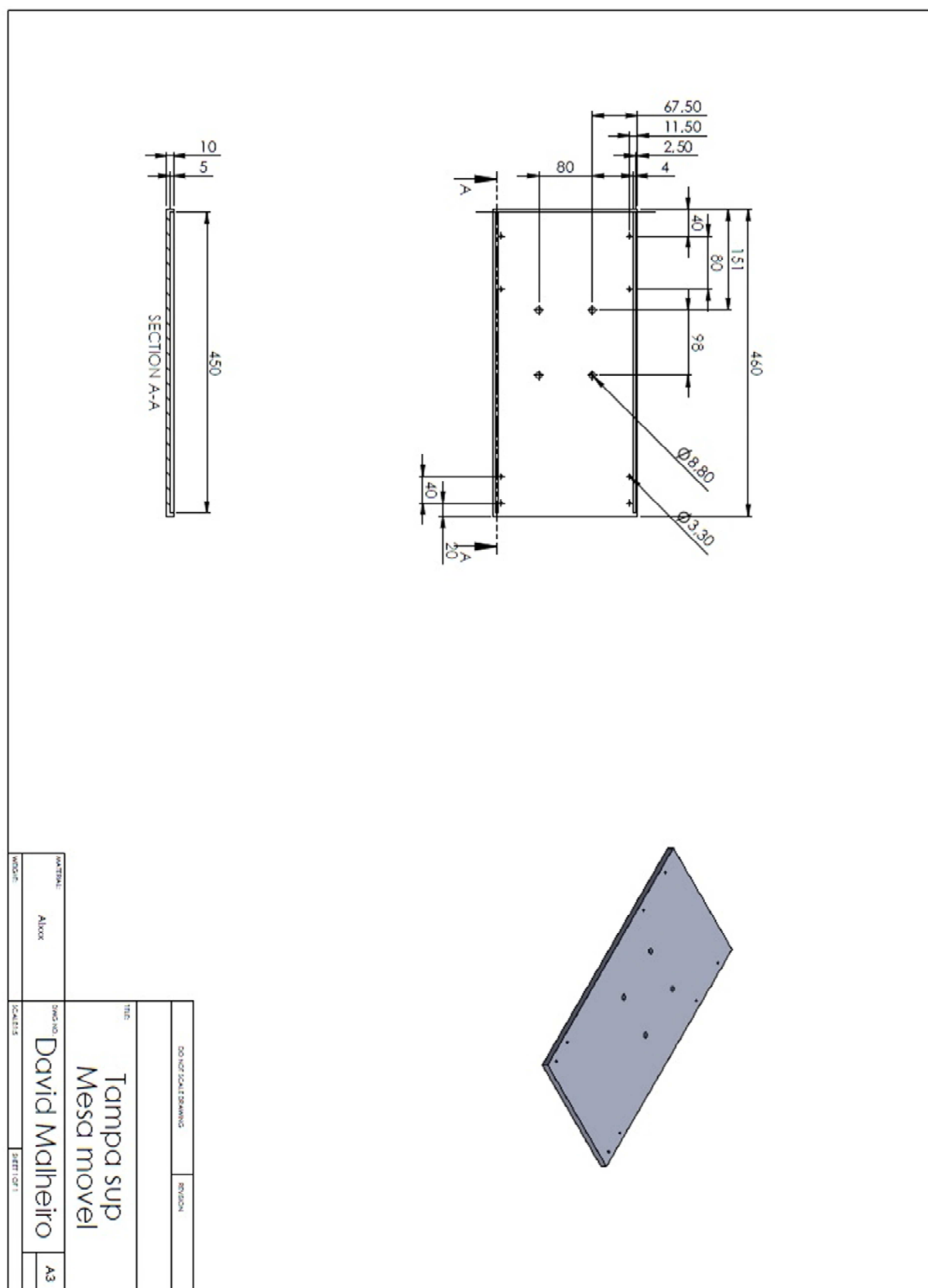


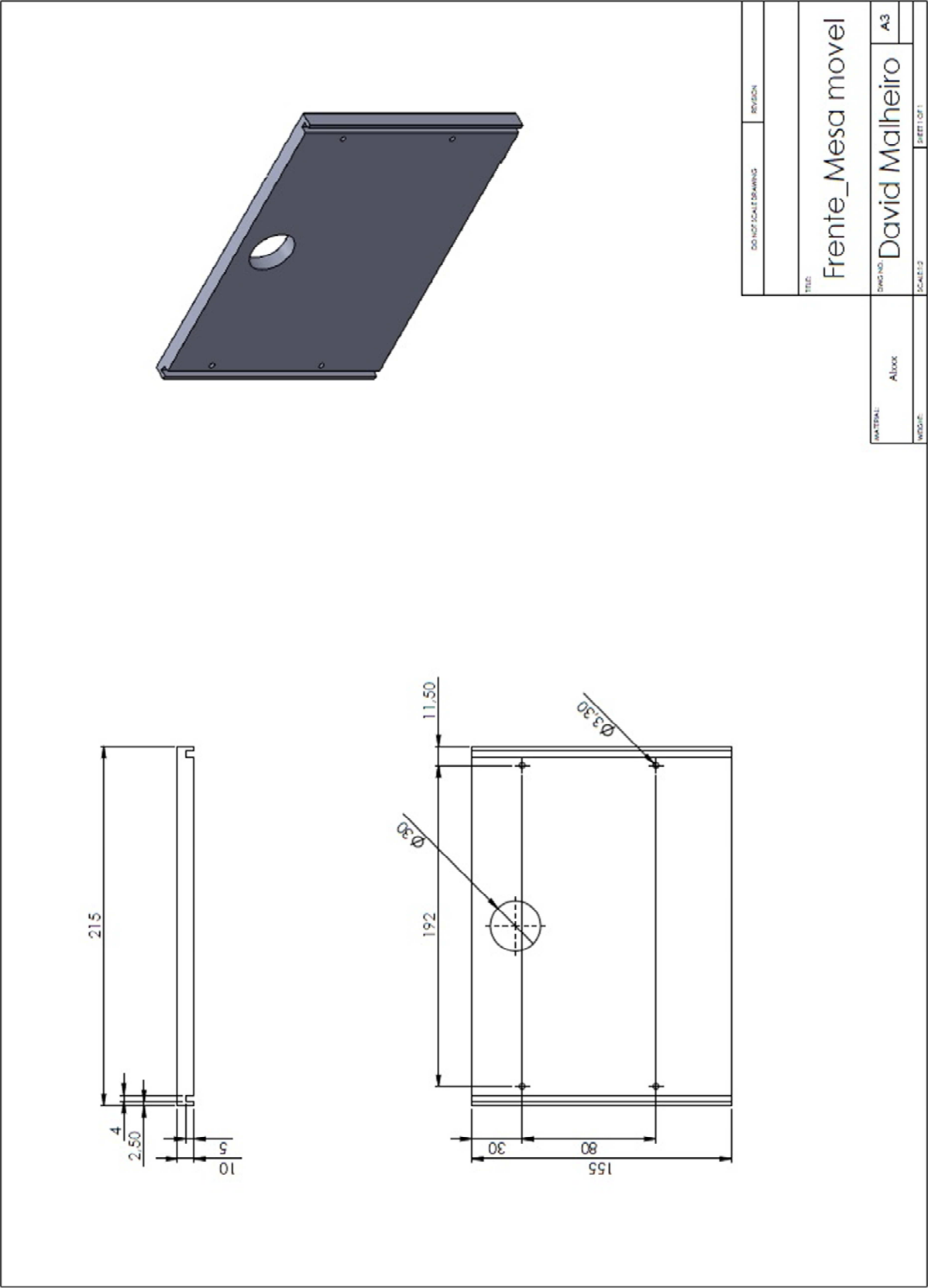


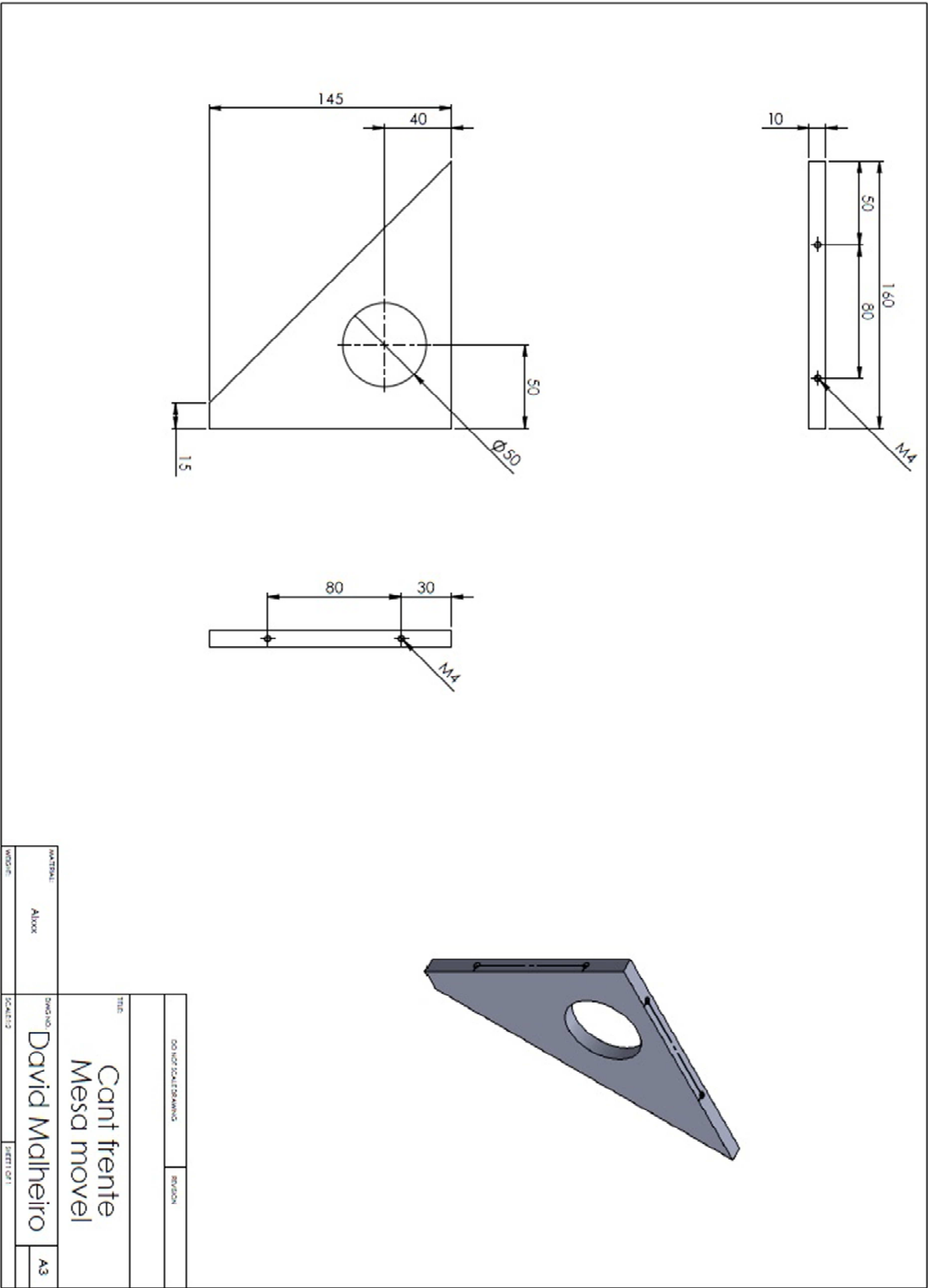


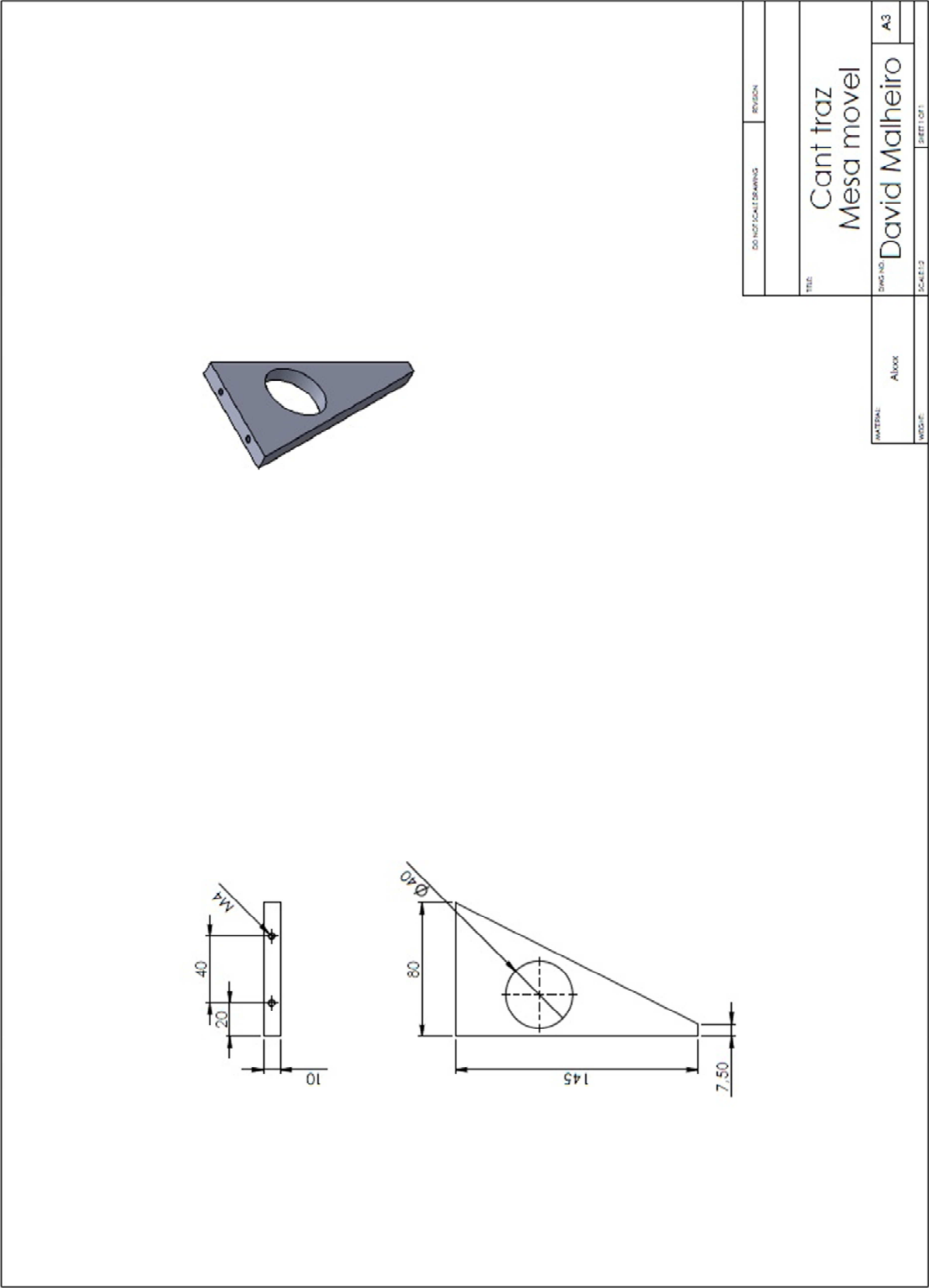


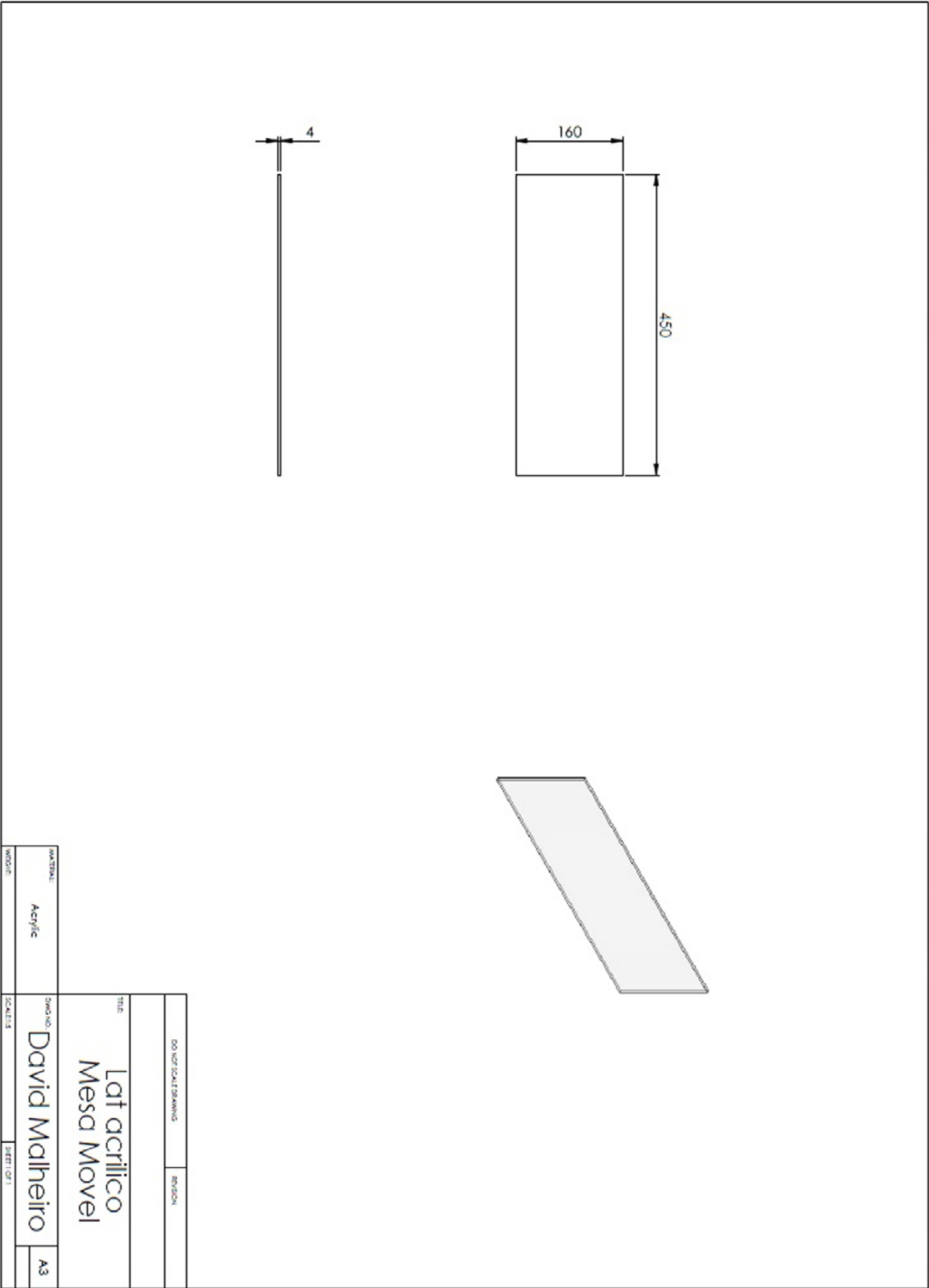
Dispositivo automático para operações de acabamento

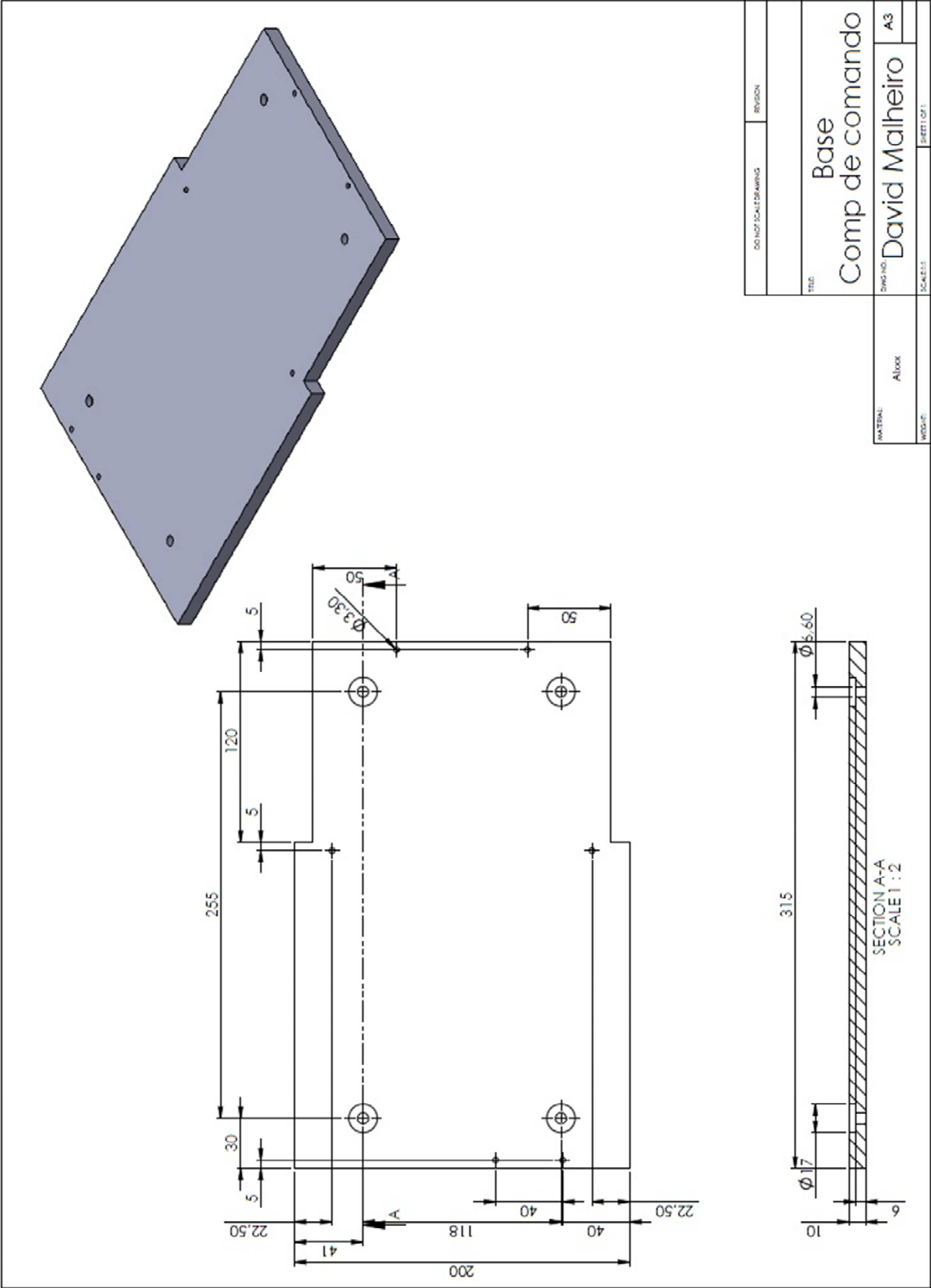




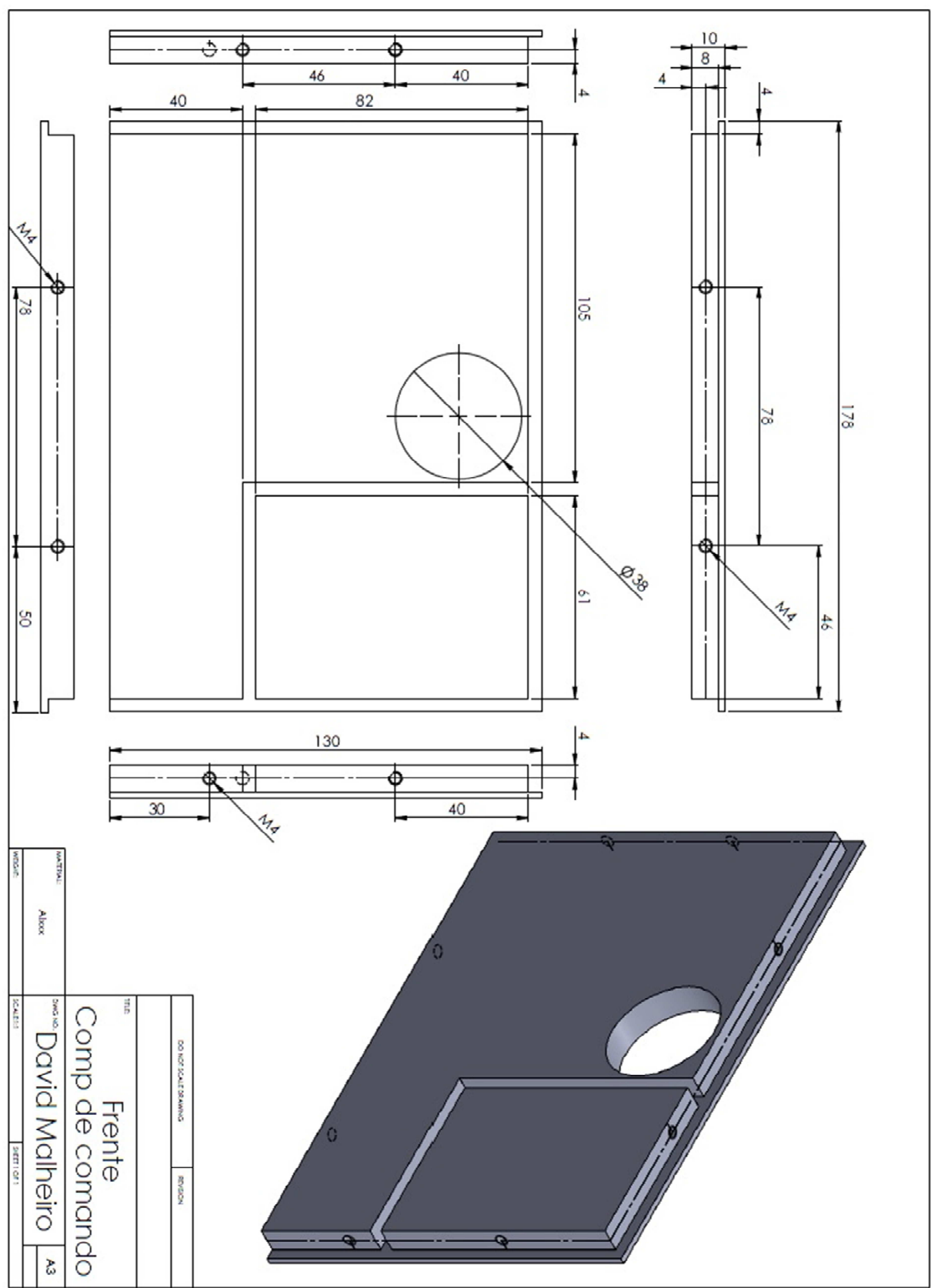


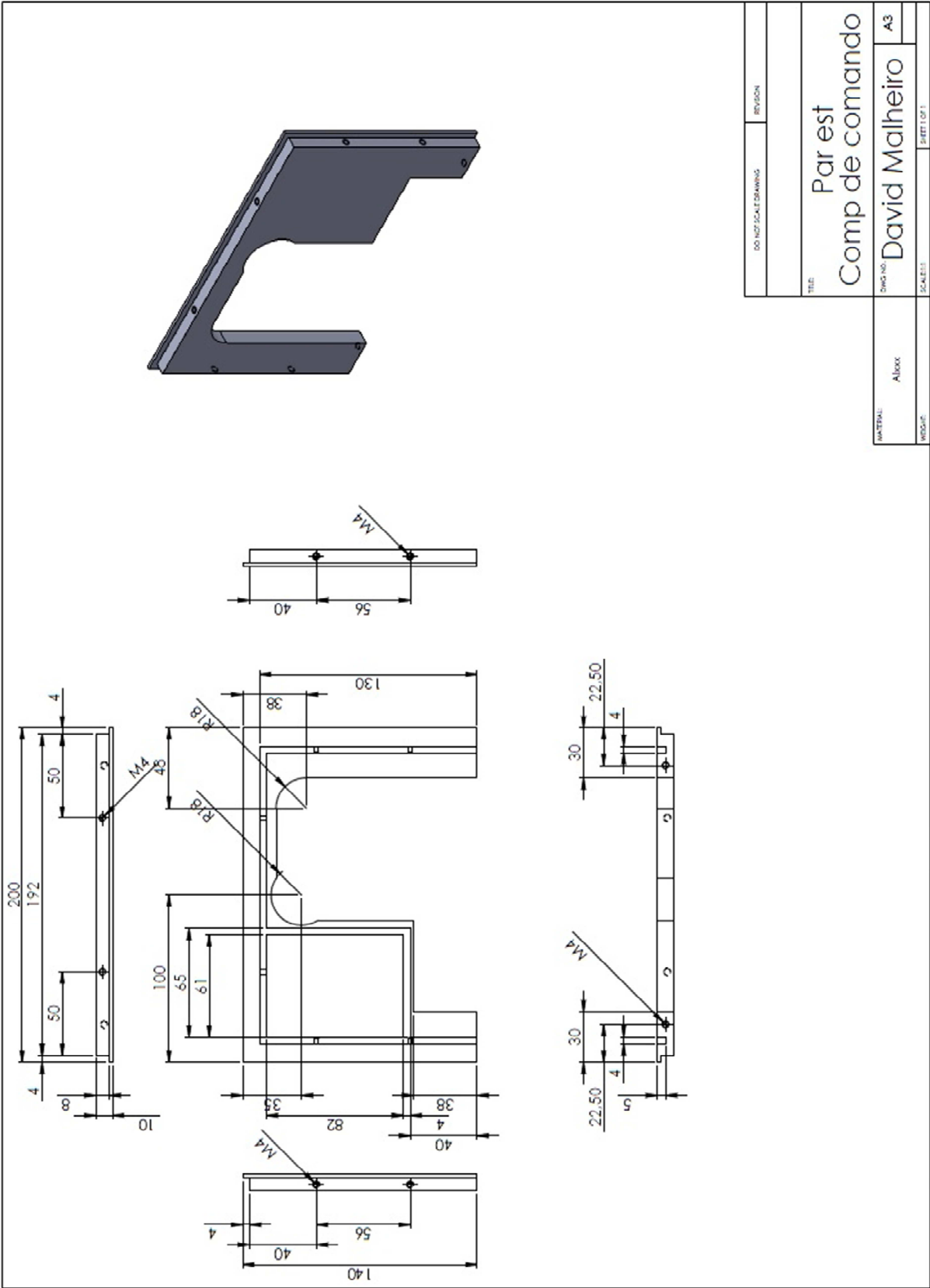


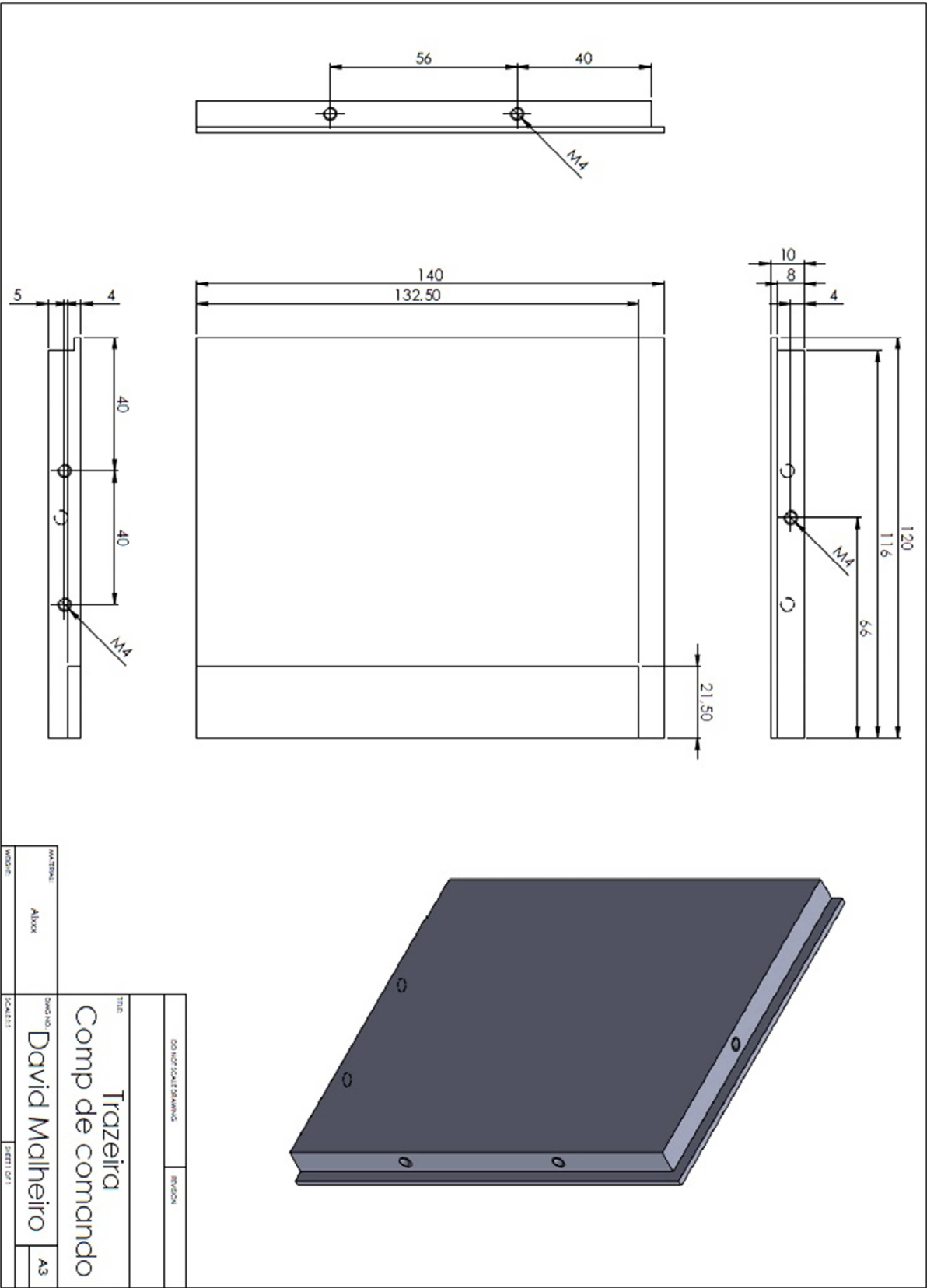


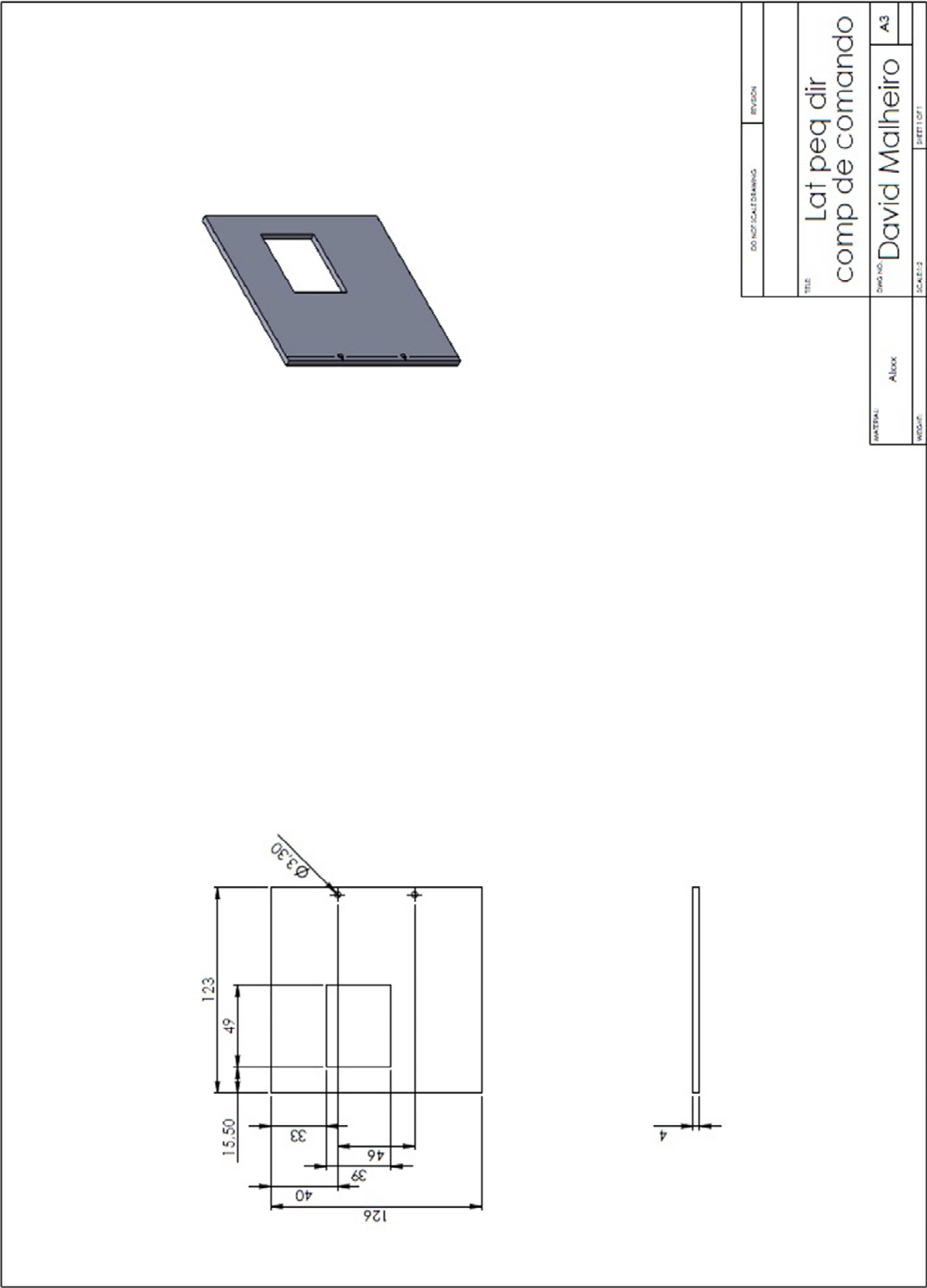


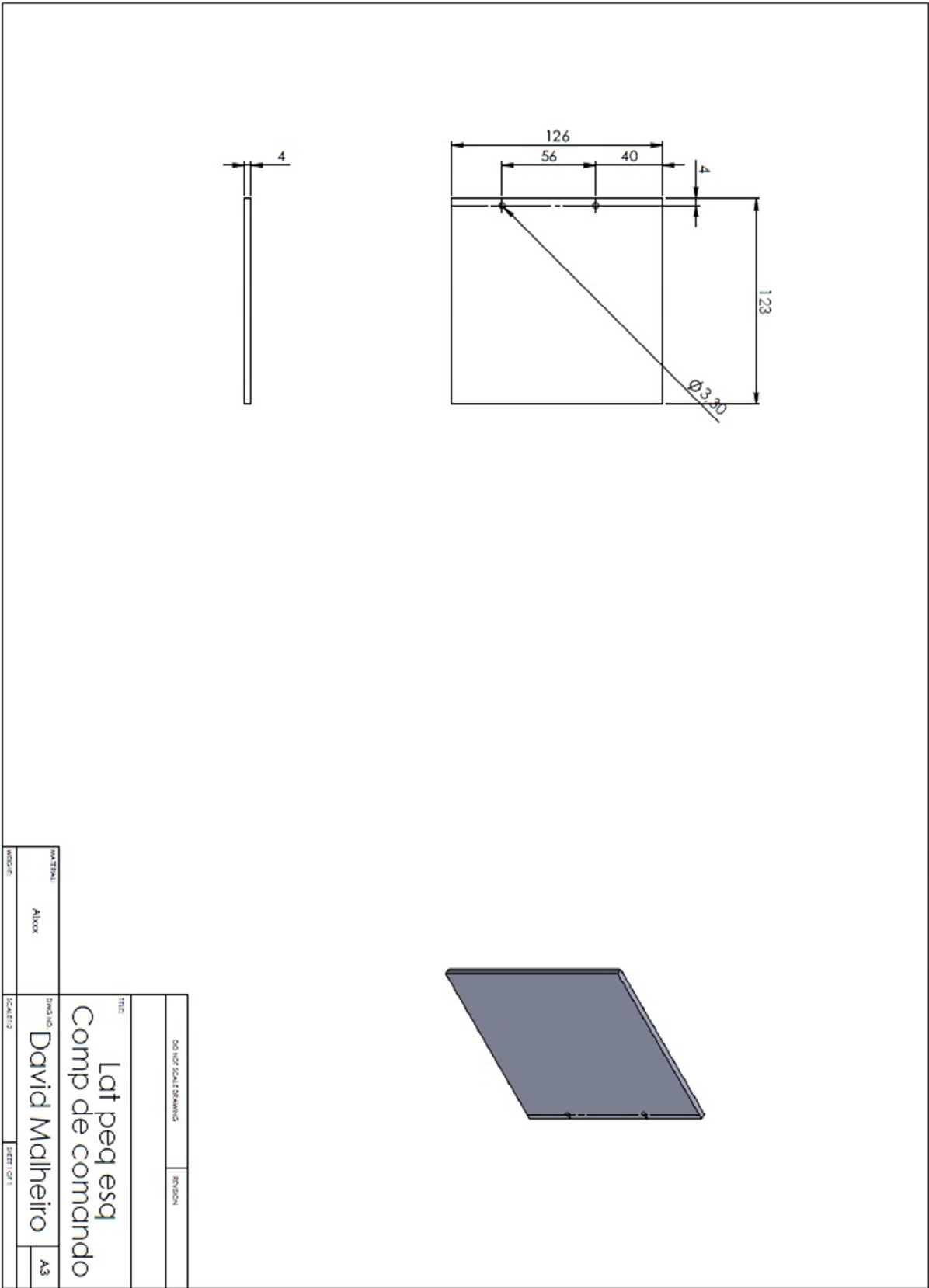
DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
TITLE	
Base Comp de comando	
DWG NO	A3
DESIGNER	David Malheiro
SCALE	SHEET 01

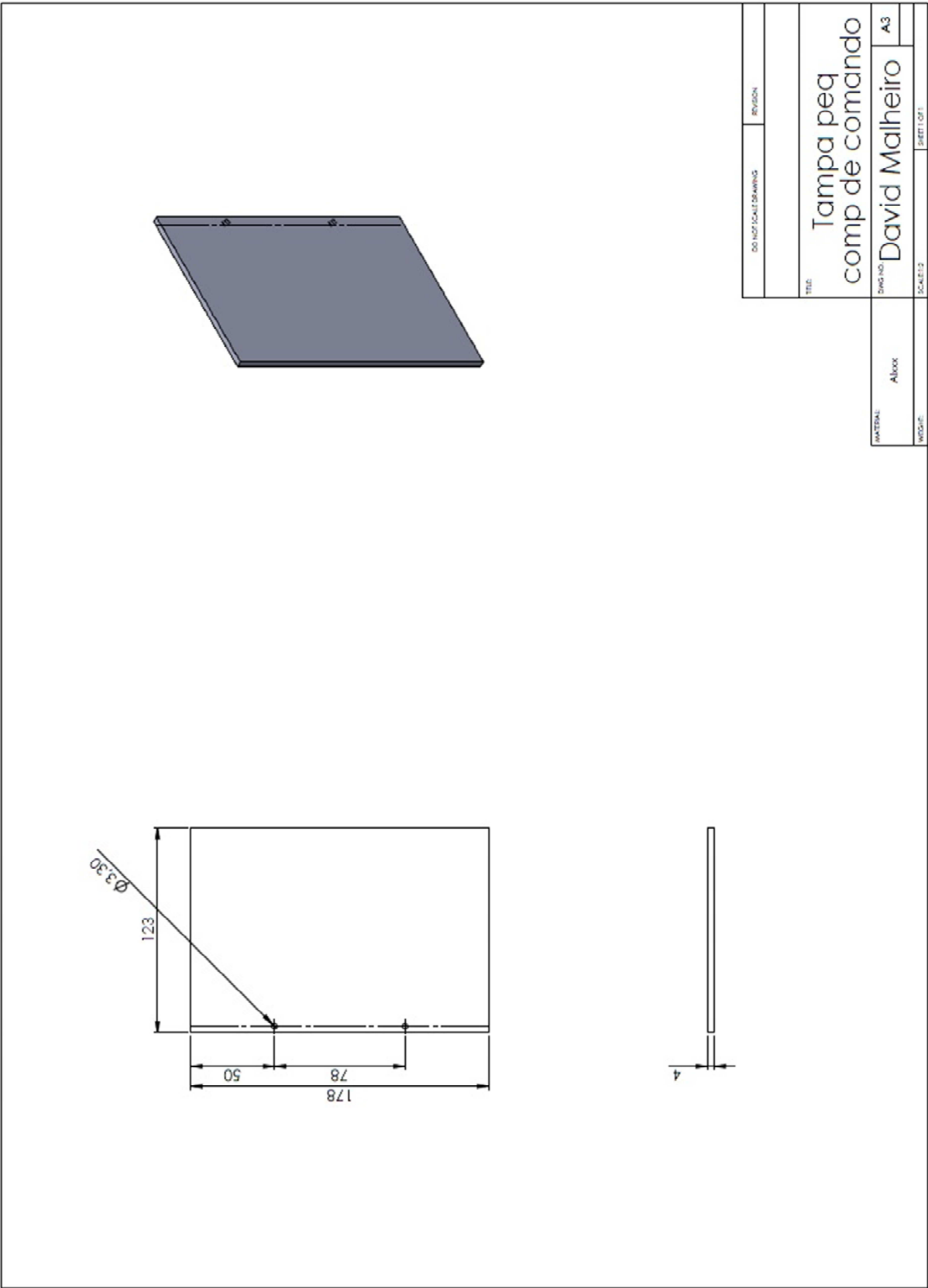


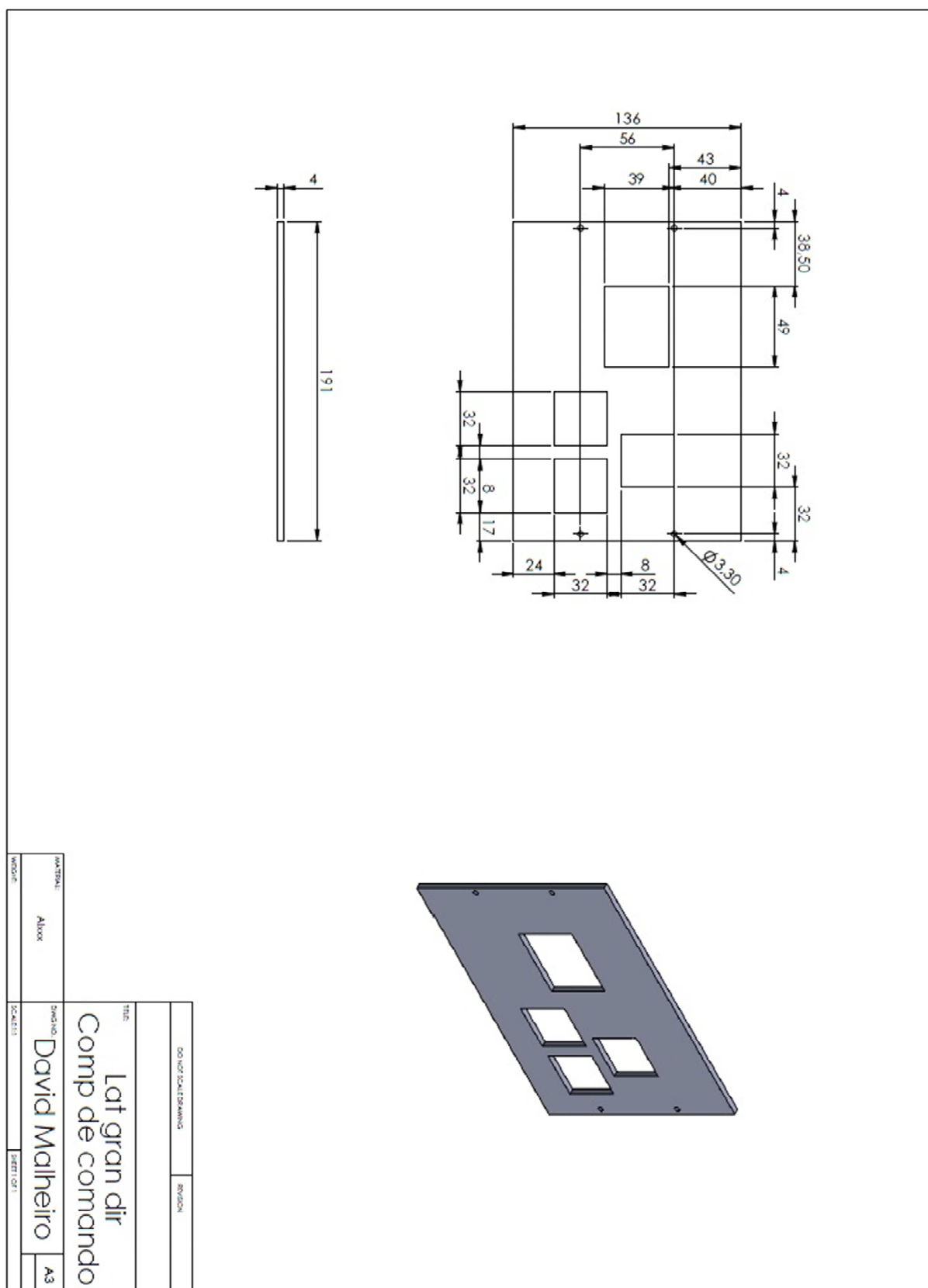


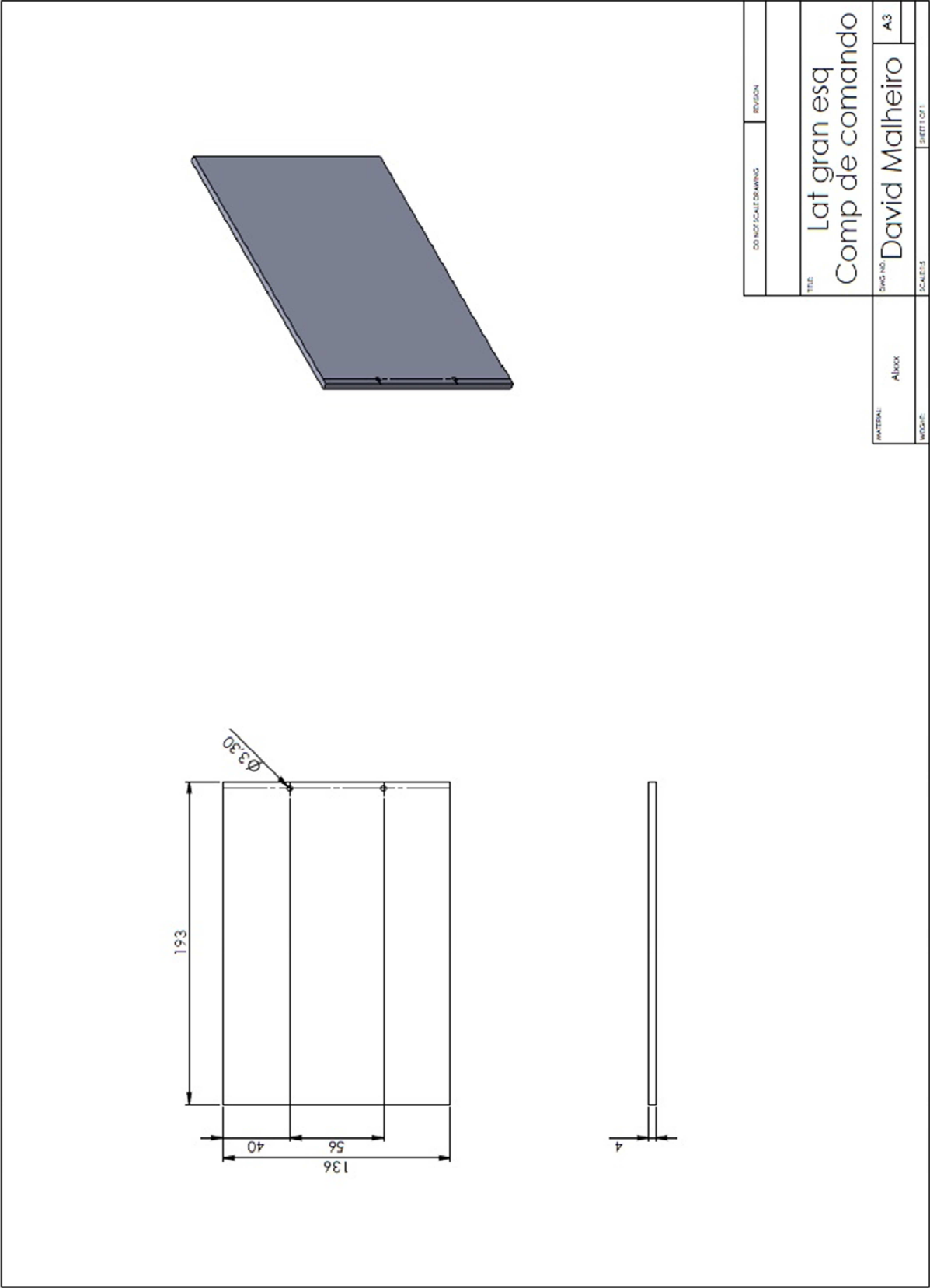


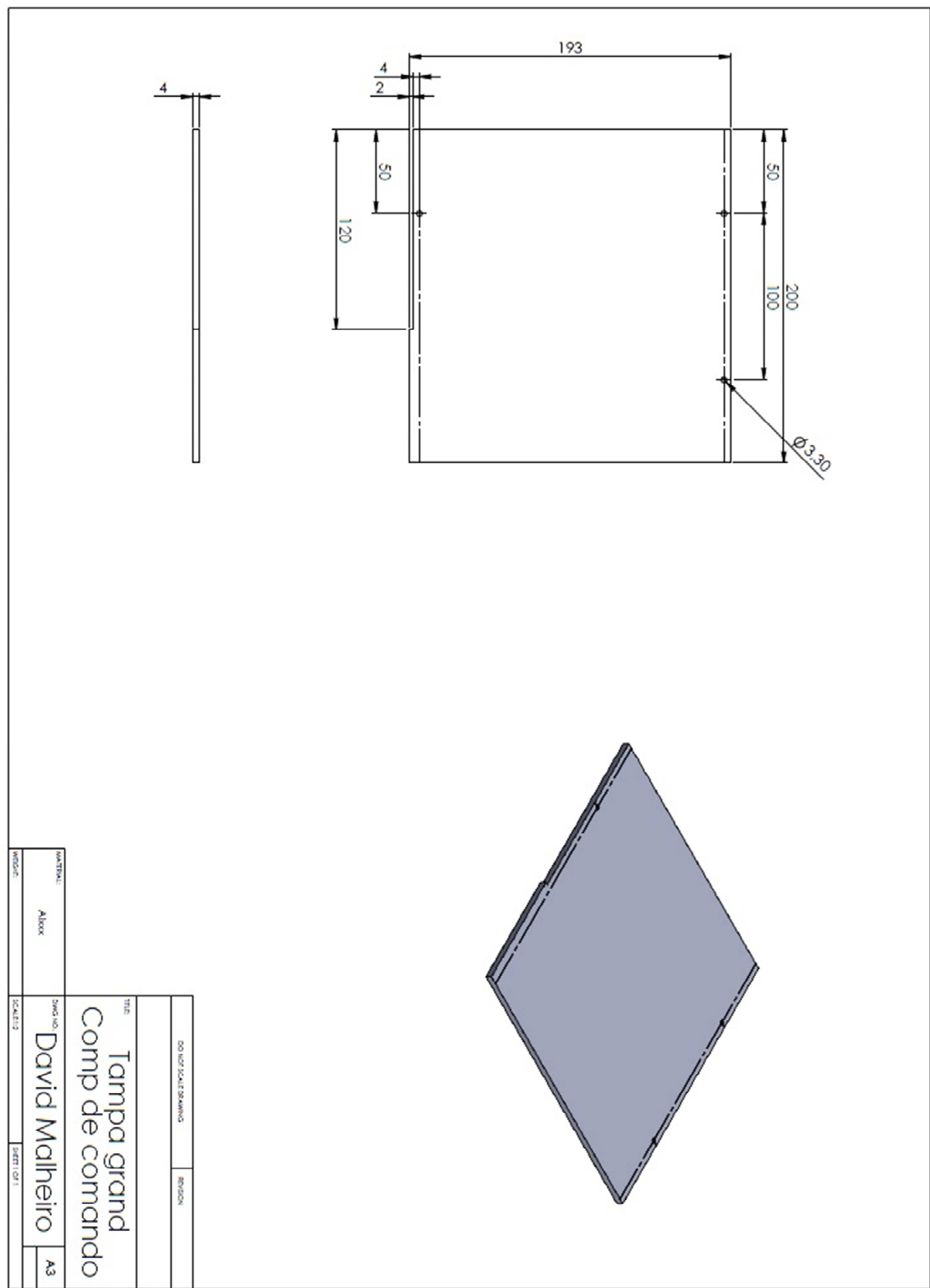












Anexo B – Código de programação do microcontrolador PIC 18LF4431

```

#define BACKSPACE 42                //define a tecla * como backspace do teclado
#define ENTER 35                    //define a tecla # como enter do teclado
#define LETRA 65, 66, 67, 68        //define como letra
#define NUMERO 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57        //define como numero

unsigned short kp, cnt, total, num, tf, bmais, bmenos, loint;
char ver_neg;
char txt1[4], txt2[4], txt3[7];
int verif, posi1=0, posi2=4;

void Converte(void);
void DAC_OUTPUT_A(unsigned char valueH_dac, unsigned char valueL_dac);
void DAC_OUTPUT_B(unsigned char valueH_dac, unsigned char valueL_dac);
void config();

void main()
{
    config();
    cnt = 0;
    Usart_init(19200);
    Lcd_Custom_Cmd(Lcd_Clear);
    Lcd_Custom_Cmd(Lcd_cursor_off);
    Lcd_Custom_Out(1, 2, "Projecto Final");
    Lcd_Custom_Out(2, 2, "David Malheiro");
    delay_ms(3000);
    Lcd_Custom_Cmd(Lcd_Clear);
    Lcd_Custom_Out(1, 1, "Num:");
    Lcd_Custom_Out(2, 1, "Posicao:");
    while(1)
    {
        kp = 0;
//-----//
        do
        {
            posi1= (POSCNTH<<8) | POSCNTL;
            if (posi1!=posi2)
            {
                IntToStr (posi1,txt3);
                Lcd_custom_out (2,10, txt3);
                if (posi1<=0b0000101110111000)
                {
                    if (posi1<=0b00000011111010000)
                    {
                        if (posi1<=0b00000001111101000)
                        {
                            if (posi1<=0b000000000000110010)
                            {
                                DAC_OUTPUT_A(0b00000000,0b00000000);
                                DAC_OUTPUT_B(0b00000000,0b00000000);
                            }
                        }
                    }
                }
                else
                {
                    DAC_OUTPUT_A(0b000000111,0b11010000);
                    DAC_OUTPUT_B(0b000000111,0b11010000);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        }
    }
    else
    {
        DAC_OUTPUT_A(0b00000111,0b11010000);
        DAC_OUTPUT_B(0b00000000,0b00000000);
    }
}
else
{
    DAC_OUTPUT_A(0b00001111,0b11111111);
    DAC_OUTPUT_B(0b00000111,0b11010000);
}
}
else
{
    DAC_OUTPUT_A(0b00001111,0b11111111);
    DAC_OUTPUT_B(0b00000000,0b00000000);
}
posi2=posi1;
} //Fim do if(1)
bmais=POSCNTH;
bmais&=0b00111111;
bmenos=POSCNTL;
bmais<<=1;
bmais&=0b01111110;
loint=bmenos&0b10000000;
loint=loint>>7;
loint&=0b00000001;
bmais=(bmais|0b10000000)|loint;
bmenos&=0b01111111;
Usart_Write(bmais);
Usart_Write(bmenos);
//-----//
    kp = Keypad_Released();
} //Fim do DO(1)
while (!kp);
if(kp==0)
{
    //n faz nada
} //Fim do if(2)
else
{
    cnt++;
    converte(); // conversão para Ascii
    if (kp==65||kp==66||kp==67||kp==68) //letras
    {
        if (kp==66||kp==67||kp==68)
        {
            Lcd_Custom_Out(1, 10,"ERRO ");
            total = 0;
            cnt = 0;
        } //Fim do if(3)
        else //Reset a posição
        {
            POSCNTL=0b00000000;
            POSCNTH=0b00000000;
        }
    }
}

```

```

else
{
    if
    (kp==48||kp==49||kp==50||kp==51||kp==52||kp==53||kp==54||kp==55||kp==56||kp==67)
    {
        num=kp-48;
        if (cnt==1)
        {
            verf=num;
        } //Fim do if(4)
        else
        {
            verf=verf*10+num;
        } //Fim do else(2)
    } //Fim do if(5)
    if (verf <= 255)
    {
        total=verf;
        if (kp == 42) //apaga o valor escrito
        {
            total = 0;
            cnt = 0;
        } //Fim do if(6)
        if (kp == 35) //confirma o valor escrito
        {
            tf = verf;
            cnt = 0;
            total=0;
        } //Fim do if(7)
    } //Fim do if(8)
    else
    {
        Lcd_Custom_Out(1, 10,"ERRO ");
        total = 0;
        cnt = 0;
    } //Fim do else(3)
    WordToStr (total, txt1);
    Lcd_Custom_Out(1, 6,txt1);
    WordToStr (tf, txt2);
    Lcd_Custom_Out(1, 11, txt2);
} //Fim do else(4)
} //Fim do else(1)
} //Fim do ciclo while
} //fim main

void config()
{
    OSCCON=0b01111110;
    delay_ms (10);
    ANSEL0=0;
    Lcd_Custom_Config(&portD,5,2,4,0,&portC,3,5,4);
    Keypad_Init(&PORTB);
    TRISA = 0b00011100;
    TRISB = 0;
    TRISC = 0;
    TRISD = 0;

    //QEI

```

Dispositivo automático para operações de acabamento

```
POSCNTH=0;
POSCNTL=0;
DFLTCON=0b00110100;    //firtros para o encoder
QEICON=0B10110100;
```

```
//SPI
```

```
SSPSTAT=0b01000000;
SSPCON=0b01110000;
TRISD.f1=0; //SPI OUT
TRISD.f3=0; //DAC clocck
TRISC.f0=0; //Chip select
PORTC.f0=1;
}
```

```
void Converte(void)
{
```

```
switch (kp)
```

```
{
case 1:
kp+= 41;
break;
case 2:
kp+= 53;
break;
case 3:
kp+= 49;
break;
case 4:
kp+= 45;
break;
case 5:
kp+= 43;
break;
case 6:
kp+= 50;
break;
case 7:
kp+= 46;
break;
case 8:
kp+= 42;
break;
case 9:
kp+= 26;
break;
case 10:
kp+= 47;
break;
case 11:
kp+= 43;
break;
case 12:
kp+= 39;
break;
case 13:
kp+= 55;
break;
case 14:
```



```
kp+= 53;
break;
case 15:
kp+= 51;
break;
case 16:
kp+= 49;
break;
}
}
```

```
void DAC_OUTPUT_A(unsigned char valueH_dac, unsigned char valueL_dac)
```

```
{
    PORTC.f0=0;
    valueH_dac&=0b00001111;
    valueH_dac|=0b00010000;
    SSPBUF=valueH_dac;
    while (!SSPSTAT.BF);
    delay_ms (5);
    SSPBUF=valueL_dac;
    while (!SSPSTAT.BF);
    delay_ms (5);
    PORTC.f0=1;
}
```

```
void DAC_OUTPUT_B(unsigned char valueH_dac, unsigned char valueL_dac)
```

```
{
    PORTC.f0=0;
    valueH_dac&=0b00001111;
    valueH_dac|=0b10010000;
    SSPBUF=valueH_dac;
    while (!SSPSTAT.BF);
    delay_ms (5);
    SSPBUF=valueL_dac;
    while (!SSPSTAT.BF);
    delay_ms (5);
    PORTC.f0=1;
}
```